

VISIT...

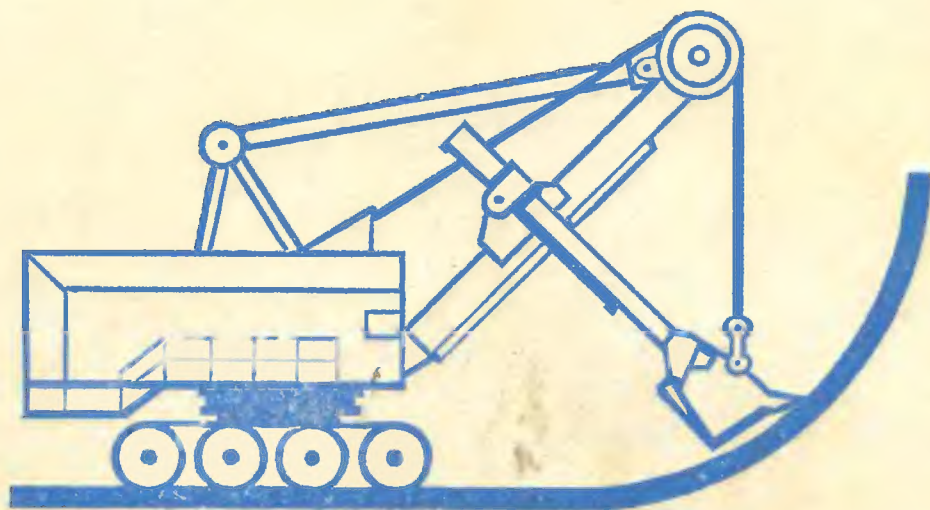
LANZAROTE
Caliente.COM

62-83
к 52

В.И.Ключев
В.М.Терехов

ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Для студентов вузов



ББК 31.291

К52

УДК 62-83 (075.8)

Рецензенты: кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ЛПИ и А. С. Филатов.

Ключев В. И., Терехов В. М.

К52 Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов. — М.: Энергия, 1980. — 360 с., ил.

В пер.: 90 к.

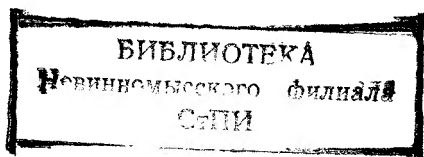
В книге излагаются общие вопросы электропривода и автоматизации рабочих режимов типовых общепромышленных механизмов непрерывного и циклического действия. Общие положения дополняются анализом конкретных примеров схем электроприводов механизмов различных машин, установок и технологических комплексов — кранов, подъемников, экскаваторов, конвейеров, земснарядов и т.п.

Книга предназначена в качестве учебника для студентов энергетических и политехнических вузов специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок», а также может быть полезна студентам других специальностей и инженерно-техническим работникам, занятым проектированием, наладкой и эксплуатацией электроприводов.

К $\frac{30307-343}{051(01)-80}$ 113-80. 2302030000

ББК 31.291

6П2.1.081



© Издательство «Энергия», 1980 г.

В. И. КЛЮЧЕВ
В. М. ТЕРЕХОВ

ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Допущено Министерством высшего
и среднего специального образования
СССР в качестве учебника для студен-
тов вузов, обучающихся по специаль-
ности «Электропривод и автоматизация
промышленных установок»



МОСКВА «ЭНЕРГИЯ» 1980

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов», предусмотренный учебным планом специальности 0628 «Электропривод и автоматизация промышленных установок», был поставлен в начале 50-х годов и обеспечен в качестве основного учебного пособия книгой М. М. Соколова «Электрооборудование общепромышленных механизмов», изданной в 1959 г. Госэнергоиздатом и в дальнейшем дважды переиздававшейся, в 1969 и 1976 гг. В соответствии с действовавшей в то время учебной программой этого курса изложение материала в указанном учебном пособии было построено по группам рабочих машин, классифицированным по частным признакам назначения, отрасли применения и т. п.

Как показал многолетний опыт чтения этого курса в Московском энергетическом институте, при такой структуре не удастся ни охватить все многообразие частных особенностей электроприводов конкретных общепромышленных механизмов, ни сформировать у студентов достаточных общих представлений о проблемах электропривода этой группы механизмов в целом, необходимых при подготовке инженеров-электроприводчиков широкого профиля. Поэтому в МЭИ была осуществлена методическая переработка курса, в результате которой были выделены типовые электроприводы общепромышленных механизмов, классифицированные по общим признакам режима работы, характеру нагрузок, способу управления и т. п. На этой основе удалось развить общие вопросы электропривода и автоматизации общепромышленных механизмов, устранить повторения и свести рассмотрение частных схем к ограниченному числу отобранных примеров, широко иллюстрирующих как основные общие вопросы, так и влияние частных особенностей конкретных машин. Эти методические позиции нашли отражение в программе одноименного курса, утвержденной Минвузом СССР в 1975 г.

В данной книге, предназначенной в качестве учебника, авторы стремились с возможной полнотой отразить вопросы,

подлежащие освещению при чтении лекций в соответствии с действующей программой. Как в содержании, так и в методике изложения материалов данной книги нашла отражение практика многократного чтения этого курса студентам специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок» в МЭИ.

В книге гл. 1—4 (кроме § 1-3) написаны В. И. Ключевым, гл. 5—8 (кроме § 5-3) и § 1-3 — В. М. Тереховым. Редактором А. М. Усмановым написан § 5-3.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам — проф. А. С. Филатову и коллективу кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ленинградского политехнического института за ценные замечания и практические рекомендации, которые способствовали улучшению книги, а также канд. техн. наук А. М. Усманову за большой труд по редактированию рукописи.

Авторы отчетливо представляют себе трудности написания учебника по данному инженерному курсу, отличающемуся несомненным своеобразием, и с благодарностью примут все советы и замечания, которые следует направлять в адрес издательства «Энергия»: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Рассматривая все многообразие современных производственных процессов, в каждом конкретном производстве можно выделить ряд операций, характер которых является общим для различных отраслей народного хозяйства. К их числу относятся доставка сырья и полуфабрикатов к истокам технологических процессов и межоперационные перемещения изделий в процессе обработки; погрузочно-разгрузочные работы на складах, железнодорожных станциях, в морских и речных портах; перемещения грузов при строительно-монтажных работах и при добыче полезных ископаемых; вентиляция, водоснабжение, канализация, непрерывный транспорт сыпучих или штучных грузов и жидкостей и многие другие.

Механизмы, выполняющие подобные операции, как правило, универсальны и имеют общепромышленное применение, в связи с чем и называются общепромышленными механизмами. Общепромышленные механизмы являются основными механизмами множества конкретных разновидностей производственных установок. К их числу относятся подъемные краны, экскаваторы, пассажирские и грузовые подъемники различной конструкции, промышленные манипуляторы и роботы, канатные дороги, эскалаторы, различные конвейеры, осуществляющие транспортировку людей и грузов, насосы, земснаряды, вентиляторы, воздуходувки и т. п.

Общепромышленные механизмы играют в народном хозяйстве страны важную роль. Они являются основным средством механизации и автоматизации различных производственных процессов. Поэтому уровень промышленного производства и производительность труда в значительной степени зависят от оснащенности производства общепромышленными механизмами и от их технического совершенства.

Наиболее универсальны как средство механизации подъемно-транспортных операций подъемные краны, нашедшие широкое распространение в самых различных отраслях промышленности, в строительстве и на транспорте. Высокая производи-

тельность труда в горнодобывающей промышленности обеспечивается полной механизацией процесса добычи с помощью различных общепромышленных механизмов: скиповых и клетевых подъемных машин, транспортеров, а на открытых разрабатках — различных экскаваторов. Откачивание воды, вентиляция шахт, снабжение рабочих мест сжатым воздухом осуществляется с помощью насосов, вентиляторов и компрессоров. Ко всем этим механизмам предъявляются жесткие требования в отношении надежности и безопасности, так как прекращение их работы может повлечь за собой не только уменьшение добычи, но и угрозу жизни людей.

Полная механизация производственного процесса является одним из необходимых условий для комплексной автоматизации его. Во многих случаях решение задачи автоматизации технологического процесса сводится к автоматизации комплекса общепромышленных механизмов, обслуживающих основной процесс. Характерным примером может служить современный зерновой элеватор. Его технологический процесс — прием, хранение и отгрузка зерна — обслуживается транспортерами, распределительными устройствами, вентиляторами и компрессорами. Индивидуальный электропривод этих механизмов позволяет успешно автоматизировать все операции, осуществить автоматический контроль за протеканием технологического процесса, устранить возможность завалов и порчи зерна, облегчить труд и повысить его производительность.

Роль общепромышленных механизмов как средств комплексной автоматизации различных производственных процессов наиболее наглядно выявляется при рассмотрении их новой, специфичной и исключительно быстро развивающейся разновидности — так называемых промышленных роботов. Промышленные роботы — это автоматические манипуляторы с программным управлением, предназначенные для выполнения перечисленных выше вспомогательных транспортных операций и некоторых основных производственных процессов (сварки, окраски и т. п.) [21]. Широкое использование машин с числовым программным управлением в различных технологических процессах создало необходимые предпосылки для их комплексной автоматизации. Однако решение этой задачи без решения проблемы автоматизации таких операций, как погрузочно-разгрузочные и складские операции, установка и снятие обрабатываемых деталей, укладка готовой продукции в тару, замена инструмента и других процессов было практически невозможно. Создание универсальных и специализированных промышленных роботов не только успешно решает эту пробле-

му, но и позволяет избавить рабочих от физически тяжелой или вредной работы, уменьшить дефицит рабочих в производствах, отличающихся тяжелыми условиями труда.

Функции и задачи, возлагаемые на общепромышленные механизмы, обуславливают большое разнообразие их электроприводов. Последние различаются как в отношении диапазона мощностей (от долей киловатт до нескольких тысяч киловатт), так и в отношении их сложности (от нерегулируемого асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором до сложных замкнутых регулируемых систем). От технического совершенства электроприводов в значительной степени зависят производительность, надежность работы, простота обслуживания и возможности автоматизации общепромышленных механизмов. Поэтому изучение вопросов электропривода и автоматизации общепромышленных механизмов, которые составляют содержание данного курса, имеет существенное практическое значение.

В подготовке инженера-электромеханика по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок» курс «Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов» играет важную роль, которая определяется спецификой этой группы механизмов: общностью основного назначения при большом многообразии исполнений, предельной простотой технологии, своеобразием нагрузок (активный момент, вентиляторная нагрузка и т. п.). Эти условия позволяют при изучении курса акцентировать внимание на общих вопросах теории электропривода в их практическом применении, что должно способствовать углублению специальной подготовки инженера-электроприводчика широкого профиля.

Многообразие разновидностей общепромышленных механизмов исключает возможность рассмотрения в небольшом по объему курсе всех частных вопросов электропривода конкретных механизмов. Общность и простота технологии позволяют выделить круг специальных вопросов электропривода и автоматизации, общих для отдельных укрупненных групп механизмов. Изучение этих вопросов в сочетании с рассмотрением в качестве примеров типовых схем электроприводов отдельных механизмов позволяет получить широкое и достаточно конкретное представление об электроприводе общепромышленных механизмов в целом.

Глава первая

ТИПОВЫЕ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫЕ МЕХАНИЗМЫ

1-1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК

К числу машин и механизмов общепромышленного применения относится обширная группа промышленных установок, отличающихся значительным многообразием конкретных разновидностей. Прежде чем приступить к изучению электроприводов и вопросов автоматизации рабочих процессов этого множества машин и механизмов, необходимо ознакомиться с их классификацией, объединяющей установки с тем или иным общим признаком в однородные группы. К числу наиболее важных классификационных признаков относятся назначение установки, ее конструктивное исполнение, область применения и характер технологического процесса.

По назначению общепромышленные установки разделяются на: 1) подъемно-транспортные машины; 2) землеройные машины; 3) машины для транспортировки жидких сред и газов, а также для сжатия газов. Каждая из этих групп содержит машины, различные по конструктивному исполнению. К числу подъемно-транспортных машин относятся мостовые, козловые и поворотные краны, перегрузочные мосты, кабель-краны, промышленные манипуляторы и роботы, стационарные вертикальные и наклонные подъемные установки дискретного действия, канатные дороги, горизонтальные и наклонные конвейеры, вертикальные ковшовые транспортеры и т. п. Землеройные машины представлены одноковшовыми и роторными экскаваторами, а также земснарядами. Наконец, машины для транспортировки жидкостей и газов включают в себя центробежные и поршневые насосы и компрессоры и центробежные вентиляторы. Подразделение на более мелкие группы можно было бы продолжить, учитывая характер транспортируемых грузов, вид рабочих органов и другие конструктивные особенности машин.

По области применения различают машиностроительные, металлургические, горные, строительные, судовые и другие машины и установки, основные механизмы которых могут быть отнесены к числу общепромышленных. Например, выпускаются специальные металлургические краны и загрузочные машины, судовые подъемно-транспортные машины, шахтные подъемные установки, поточно-транспортные системы различного отраслевого применения и т. п. При этом в большинстве случаев область применения оказывает более или менее значительное влияние на конструктивное исполнение машин. Башенный кран является специальной строительной машиной, а шахтная подъемная установка имеет специфические конструктивные отличия от пассажирского лифта. В то же время можно указать и примеры, когда однотипные машины, применяемые в различных отраслях, существенных конструктивных отличий не имеют. Специфика отраслевого применения в этих случаях может проявляться в режимах работы и условиях эксплуатации их электроприводов.

По характеру технологического процесса общепромышленные механизмы можно разделить на две большие группы: механизмы циклического (прерывного) действия, рабочий процесс которых состоит из повторяющихся однотипных циклов, и механизмы непрерывного действия, технологический процесс которых имеет непрерывный характер. Типичными примерами первых могут служить краны, шахтные подъемные машины, лифты, а вторых — эскалаторы, землесосы, конвейеры. Характер технологического процесса оказывает основное влияние на режимы работы электропривода и определяет главные требования, предъявляемые к нему в отношении мощности и перегрузочной способности, динамических качеств, необходимости и точности регулирования координат электромеханической системы, уровня автоматизации и т. п. Эти требования, конечно, зависят и от назначения установки, и от отрасли ее применения, но определяются, главным образом, конкретным характером технологического процесса. Так, механизмы одного назначения, например конвейеры, предъявляют к своему электроприводу существенно различные требования, если один из них работает непрерывно, а технологический процесс другого имеет циклический характер.

В современной технической литературе механическое и электрическое оборудование каждой из перечисленных выше разновидностей общепромышленных установок получило достаточно подробное освещение. При этом в основе отбора рассматриваемых установок обычно лежит классификация по назначению

и исполнению. В качестве примера таких книг в списке литературы указаны книги по электрооборудованию кранов [7, 8], подъемно-транспортных машин [10], экскаваторов [11], лифтов [12, 26], конвейеров [13, 15], насосов, компрессоров и вентиляторов [16]. Кроме того, имеется большое число книг, в которых подбор рассматриваемых установок и изложение материала основаны на отраслевом принципе — увязаны с конкретной областью применения отдельных общепромышленных механизмов. Примерами могут служить рекомендованные в списке литературы книги по электрооборудованию строительных [17, 19], судовых [9], горных [18] и других машин.

Указанная литература детально освещает конструкции, режимы работы и схемы электроприводов конкретных видов машин, поэтому может быть полезна при курсовом и дипломном проектировании. При изучении данного курса основное внимание должно быть сосредоточено не на частных особенностях конкретных машин, а на общих закономерностях, свойственных однотипным электроприводам различных по конструкции и назначению промышленных установок. Курс, завершающий подготовку инженера-электромеханика широкого профиля, должен закрепить полученный за время обучения комплекс общих знаний, показать, что при известных технологических требованиях он достаточен для решения вопросов электропривода и автоматизации промышленных установок в любых отраслях народного хозяйства, и ознакомить с общим порядком определения требований к электроприводу на основе анализа технологического процесса.

Из всех рассмотренных классификационных признаков этим задачам наиболее полно соответствует классификация общепромышленных механизмов по характеру технологического процесса. На этой основе изучение электропривода и автоматизации общепромышленных механизмов удастся систематизировать и обобщить, объединив различные по назначению, конструкции и отрасли применения машины и установки в группы, однотипные по режимам работы, нагрузкам электропривода и уровню автоматизации технологического процесса.

Из изложенного следует, что, приступая к изучению вопросов электропривода и автоматизации общепромышленных установок, необходимо разделить их на установки с циклическим и непрерывным рабочим процессом и выделить их характерные механизмы, которые могут быть названы типовыми общепромышленными механизмами. С этой целью проведем краткий обзор конструктивных особенностей основных групп рассматриваемых установок.

1-2. ОБЗОР ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Обширная группа общепромышленных установок циклического действия включает в себя подъемные краны, одноковшовые экскаваторы, стационарные подъемники различных конструкций и назначения, маятниковые канатные дороги, конвейеры циклического действия, различные манипуляторы и промышленные роботы. Общим для этих установок является режим работы, при котором технологический процесс состоит из ряда повторяющихся однотипных циклов, каждый из которых представляет собой законченную операцию загрузки рабочего органа, перемещения его из исходной точки в пункт назначения и разгрузки. В зависимости от специализации цикл может содержать выполнение предусмотренных технологией процессов, например черпания грунта, кантования перемещаемых изделий и т. п.

Основные механизмы таких установок, как правило, имеют реверсивный электропривод, рассчитанный для работы в интенсивном повторно-кратковременном режиме. В каждом рабочем цикле имеют место неустановившиеся режимы работы электропривода: пуски, реверсы, торможения, оказывающие существенное влияние на производительность механизма, на динамические нагрузки привода и механизма, на к. п. д. установки и на ряд других факторов. Все эти условия предъявляют к электроприводу сложные требования, в значительной степени общие для всей рассматриваемой группы механизмов.

Несмотря на большое многообразие конкретных установок циклического действия, их рабочие движения обслуживаются ограниченным числом однотипных механизмов.

Подъемные краны объединяют большую группу подъемно-транспортных установок циклического действия, общее представление о которых могут дать характерные примеры конструктивных схем, приведенные на рис. 1-1, а, б и 1-2, а, б.

На промышленных предприятиях наиболее распространенным и универсальным подъемно-транспортным устройством является мостовой кран (рис. 1-1, а). Стальная конструкция моста крана 1 опирается на ходовые тележки и с помощью механизма передвижения 3 может перемещаться по подкрановым путям 2, укрепленным над обслуживаемой площадью на стационарных опорах. Вдоль моста крана проложены рельсы, по которым перемещается тележка 4 с установленными на ней механизмом передвижения и подъемной лебедкой, осуществляющей подъем и спуск грузов. Таким образом, основными меха-

низмами мостового крана являются: механизм передвижения моста, механизм передвижения тележки и подъемная лебедка, которые снабжаются индивидуальным электроприводом.

В зависимости от вида грузозахватывающего устройства 5 различают крюковые, магнитные, грейферные, клешевые и тому подобные краны. На тележке грейферного крана обычно устанавливаются две лебедки, одна из которых служит для закрывания грейфера. Подъем закрытого грейфера осуществляется обеими лебедками.

На мосту крана на одном рельсовом пути могут устанавливаться две или три тележки. Так, магнитно-грейферный кран имеет магнитную тележку с лебедкой подъема магнита и грейферную тележку с лебедками подъема и закрывания грейфера. Такой кран имеет три механизма передвижения и три подъемные лебедки. Таким образом, указанные модификации кранов имеют однотипные механизмы, но в различном числе.

Козловые краны, которые предназначены для работы под открытым небом, в отношении рабочих движений вполне аналогичны мостовым. Вариант конструктивной схемы такого крана приведен на рис. 1-1, б. Здесь несущая ферма крана 1 опирается на подвижные опоры 2, перемещающиеся с помощью нескольких пар ходовых тележек 3, часть из которых является движущей. Соответственно козловой кран имеет те же основные механизмы, что и мостовой: механизм передвижения моста (иногда с индивидуальным приводом каждой ведущей тележки), механизм передвижения тележки 4 и размещенные на ней лебедки подъема и закрывания грейфера.

Такую же конструктивную схему и те же основные механизмы имеют перегрузочные мосты (например, рудные, угольные перегрузатели), предназначенные для обслуживания обширных открытых складских территорий. Это — крупные подъемно-транспортные сооружения, пролет которых в ряде случаев превышает 100 м. Несколькими сотнями метров измеряется пролет так называемых кабель-кранов, в которых вместо жесткой фермы 1 используется несущий стальной канат.

На рис. 1-2, а, б представлены в качестве примера две конструктивные схемы поворотных кранов. Строительный башенный кран (рис. 1-2, а) имеет башню 1, портал которой опирается на ходовые тележки 2. В верхней части башни имеется поворотный круг 6, на котором вращается поворотная головка башни 4 со стрелой 3 и консолью противовеса 5. Изменение вылета крюка 8 достигается перемещением тележки 7 вдоль стрелы (в других конструкциях для этой цели используется подъем — опускание стрелы). Все рабочие движения крана об-

служиваются следующими механизмами: подъемной лебедкой, механизмом передвижения крана, механизмом передвижения тележки и механизмом поворота. Необходимо заметить, что на башенных кранах конструктивно поворот стрелы осуществляется с помощью обычной тяговой лебедки с бесконечным канатом, равно как и передвижение крюковой тележки вдоль стрелы.

Портальный кран (рис. 1-2, б) является наиболее характерным представителем группы поворотных кранов. Основанием крана является портал 1, который с помощью механизма передвижения с индивидуальным электроприводом ходовых тележек 4 может перемещаться по подкрановым путям. Поворотная платформа 2 опирается на портал через роликовый круг или поворотные балансирующие тележки, катающиеся по кольцевому рельсу при вращении платформы механизмом поворота. Угол наклона стрелы крана 3 может изменяться с помощью

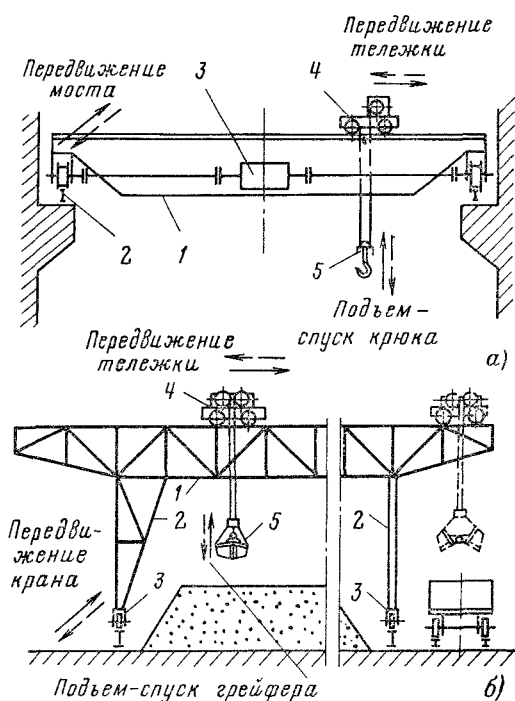


Рис. 1-1. Примеры конструктивных схем мостовых подъемных кранов.

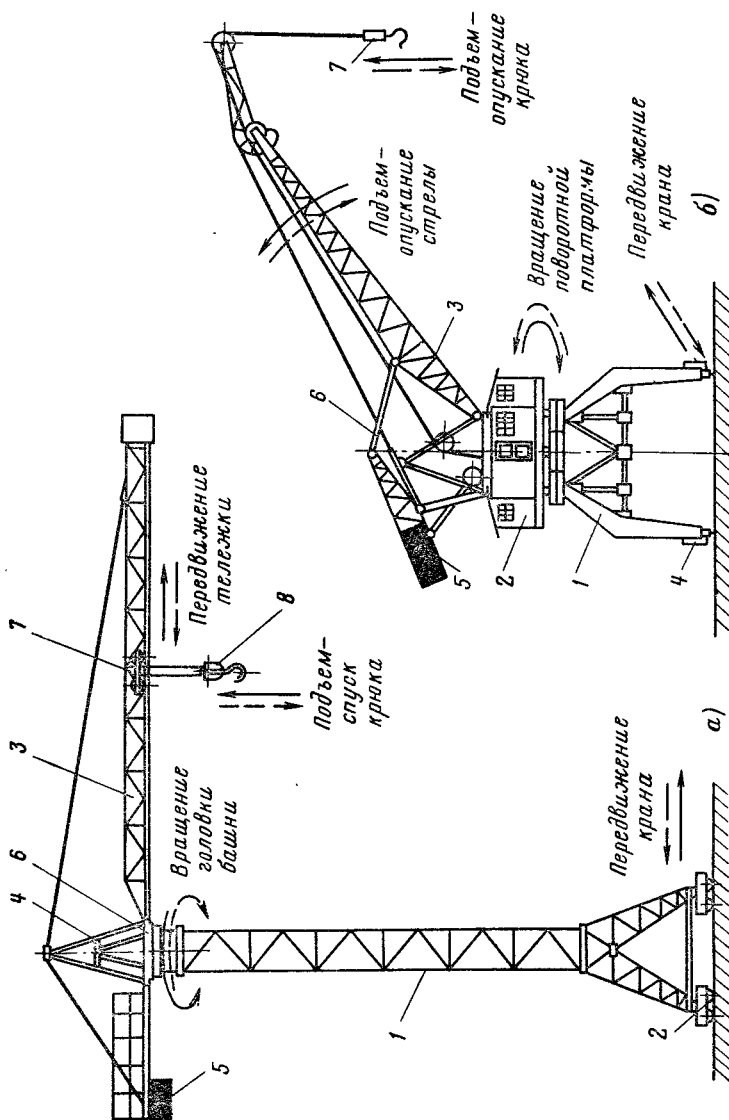


Рис. 1-2. Примеры конструктивных схем поворотных подъемных кранов.

лебедки изменения вылета. Необходимая уравновешенность крана при разных вылетах стрелы обеспечивается подвижным противовесом 5, связанным со стрелой рычагом 6. Подъем и опускание крюка 7 осуществляется подъемной лебедкой, установленной в машинном зале поворотной платформы 2. На грейферных портальных кранах, оборудованных двухканатными грейферами, устанавливаются две однотипные подъемные лебедки для подъема и закрывания грейфера.

Одноковшовые экскаваторы (рис. 1-3 и 1-4) в отношении рабочих движений и конструкции имеют много общего с поворотными, например портальными, кранами. Небольшие экскаваторы могут при необходимости работать в качестве подъемных кранов, так как выполняются универсальными со сменным рабочим оборудованием. Более крупные экскаваторы являются специализированными землеройными машинами, предназначенными только для черпания грунта или предварительно разрушенной взрывом скальной породы и перемещения наполненного ковша к месту выгрузки.

Экскаваторы широко применяются на строительстве городов, каналов и гидроэлектростанций, при сооружении шоссейных и железных дорог и на открытых разработках полезных ископаемых. Различные условия работы и объемы земляных работ требуют применения машин различной конструкции и производительности.

По конструкции рабочего органа различают ряд типов экскаваторов: прямая лопата, обратная лопата, драглайн, лопата-струг, скребок и т. п. По конструкции механизма передвижения

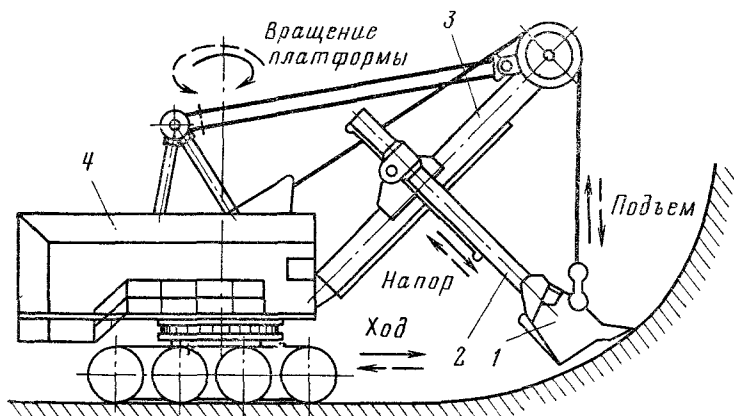


Рис. 1-3. Общий вид экскаватора-лопаты.

можно выделить гусеничные и шагающие экскаваторы, а также экскаваторы на железнодорожном, рельсовом ходу.

Экскаваторы с емкостью ковша более 3 м^3 обычно имеют оборудование прямой лопаты или драглайна. Драглайны применяются для работ, требующих перемещения породы на большие расстояния при сравнительно мягких грунтах; на более твердых грунтах, но с меньшим радиусом действия работают лопаты.

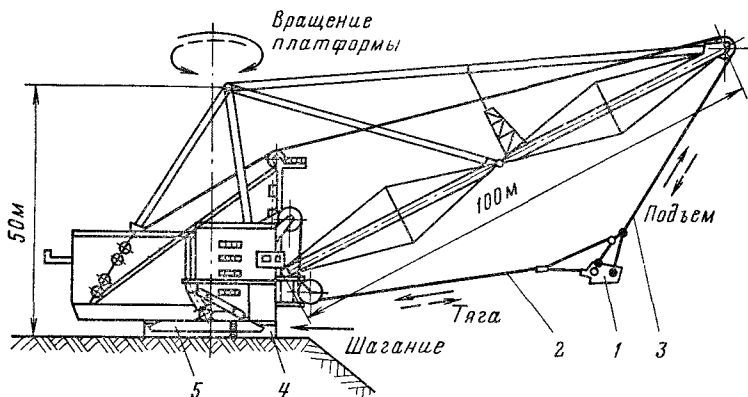


Рис. 1-4. Общий вид экскаватора-драглайна типа ЭШ-100/100.

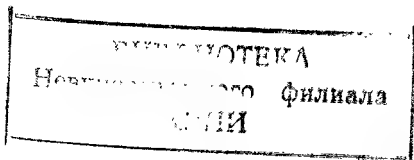
Экскаватор-лопата (рис. 1-3) имеет ковш 1, жестко связанный с рукоятью 2, шарнирно укрепленной на стреле 3 и имеющей возможность поступательного перемещения. Наполнение ковша производится с помощью двух рабочих движений: подъема ковша и поступательного движения рукояти, создающего напор для внедрения зубьев ковша в грунт. Третьим рабочим движением является поворот платформы 4 экскаватора; оно необходимо для перемещения ковша к месту выгрузки и в забой и имеется на всех машинах независимо от типа рабочего оборудования. Для открывания днища ковша при разгрузке служит вспомогательный двигатель, укрепленный на стреле, вал двигателя тросом связан с засовом, удерживающим днище ковша в закрытом положении. Основными механизмами экскаватора-лопаты являются: механизм подъема (подъемная лебедка), механизм напора и механизм поворота. Необходимые перемещения экскаватора производятся с помощью гусеничного механизма передвижения (хода).

Жесткое оборудование экскаватора-лопаты создает благоприятные условия для погрузки грунта в транспорт — железнодорожные думпкары или мощные автомобили-самосвалы. Различают карьерные и вскрышные экскаваторы-лопаты. Карьерные экскаваторы предназначаются для разработки скальных грунтов, в связи с чем имеют укороченное оборудование (стрелу и рукоять) повышенной прочности. Наиболее распространенной машиной такого типа является экскаватор ЭКГ-4,6 (экскаватор карьерный гусеничный с емкостью ковша 4,6 м³). Более крупной карьерной машиной является экскаватор типа ЭКГ-8, имеющий ковш 8 м³. Вскрышные экскаваторы предназначены для работы в более легких грунтах и имеют удлиненное оборудование облегченной конструкции. Наиболее крупной из выпущенных в нашей стране машин такого типа является экскаватор ЭВГ-35/65М (экскаватор вскрышной гусеничный с емкостью ковша 35 м³ и длиной стрелы 65 м).

Экскаватор-драглайн (рис. 1-4) имеет ковш 1, свободно подвешенный на канатах. Наполнение ковша (черпание) производится путем подтягивания его к машине с помощью тягового каната 2. При этом ковш внедряется в грунт под действием собственного веса и удерживается от чрезмерного заглубления с помощью подъемных канатов 3. С помощью подъемных канатов производится подъем ковша к голове стрелы, в процессе которого тяговые канаты удерживают загруженный ковш от опрокидывания. Третьим рабочим движением в цикле экскавации является поворот на выгрузку и в забой. В конце поворота на выгрузку тяговые канаты ослабляются, что вызывает опрокидывание и разгрузку ковша.

Таким образом, основными механизмами экскаватора-драглайна являются одинаковые по конструкции подъемная и тяговая лебедки и механизм поворота. Драглайны используются для вскрышных работ при относительно слабых грунтах. По условиям выполнения таких работ экскаватор часто, разрабатывая отвалы, должен стоять на насыпном грунте и перемещаться по этому мягкому основанию. Для уменьшения давления на грунт при работе драглайн опирается на круглую плиту большого диаметра (так называемую базу 4), а для передвижения используется механизм шагания с опорными лыжами 5 большой площади. Наиболее массовой машиной такого типа является ЭШ-5/45М (экскаватор шагающий с емкостью ковша 5 м³ и длиной стрелы 45 м). Выпускаются также более мощные экскаваторы типов ЭШ-10/70А, ЭШ-15/90А и др.

Крупные одноковшовые экскаваторы являются высокопроизводительными землеройными машинами, представляющими



собой уникальные по габаритам, массе и мощности главных электроприводов технические сооружения. В этом можно убедиться, рассматривая приведенный на рис. 1-4 с указанием основных размеров схематический общий вид недавно введенного в действие самого мощного в нашей стране шагающего экскаватора-драглайна типа ЭШ-100/100, имеющего ковш емкостью 100 м³ и длину стрелы 100 м. Он оборудован совершенными электроприводами основных механизмов большой мощности, которая для подъемной и тяговой лебедок составляет по 10 000 кВт, а электропривод поворота имеет восемь двигателей по 1000 кВт каждый. Исключительный эффект повышения производительности труда на открытых горных работах за счет применения машин такой мощности в некоторой мере можно представить, если учесть, что экскаватор является послушным и мощным продолжением рук одного землекопа-оператора, который воздействуя на рукоятки командоаппаратов главных электроприводов, за смену без тяжелого физического труда производит такой же объем земляных работ, что и армия землекопов в несколько десятков тысяч человек.

Манипуляторами принято называть технические устройства, предназначенные для воспроизведения некоторых двигательных функций рук человека. Так как в зависимости от назначения число воспроизводимых функций, рабочих движений и соответственно число степеней свободы конкретных манипуляторов может быть различным, этому определению соответствует широкий класс устройств, которые по способу управления разделяются на две принципиально различные группы: копирующие манипуляторы (телеоператоры) и координатные (командные) манипуляторы.

Копирующий манипулятор управляется задающим устройством, представляющим собой механизм, подобный механизму «руки» манипулятора. Движения руки оператора, воздействующей на задающее устройство, с помощью следящих приводов воспроизводятся исполнительным органом манипулятора. Чем сложнее операции, выполняемые с помощью манипулятора, тем больше требуемое его подобие руке человека; при этом возникает необходимость двустороннего действия системы дистанционной передачи усилий с целью отражения в задающем устройстве усилий, создаваемых манипулятором [23]. Такие манипуляторы необходимы главным образом для производства работ в условиях, опасных для жизнедеятельности человеческого организма, например в зонах высоких температур, радиации, химически активных сред.

Координатный манипулятор управляется оператором путем воздействия на командоаппараты, обеспечивающие включение и отключение приводов перемещений по соответствующим координатам и задание их скоростей либо дозированных перемещений. Отсутствие копирующего задающего механизма упрощает конструкцию манипулятора и облегчает задачу автоматического программного и адаптивного управления его работой, позволяя возложить формирование задающих сигналов по каждой координате на ЭВМ. В случае полной автоматизации рабочего цикла координатный манипулятор может быть назван промышленным роботом.

Промышленные роботы представляют собой автоматические манипуляторы с программным управлением, основное назначение которых и режимы работы полностью соответствуют отмеченным в начале этого параграфа общепромышленным установкам циклического действия. Специфичность конструкций, кинематики и динамики манипуляторов, уровень требований к управляемости и точности работы роботов, возможность наделения их способностью самообучения, а в перспективе — способностью самостоятельного ориентирования в окружающей среде и даже «искусственным интеллектом» и другие факторы выделяют роботы из ряда традиционных средств комплексной механизации и автоматизации производственных процессов и уже привели к созданию новой самостоятельной и быстро развивающейся отрасли техники, получившей название робототехники.

Конструктивные схемы манипуляторов промышленных роботов весьма разнообразны, зависят от выбора системы координат, в которой должно осуществляться перемещение схвата, и существенно усложняются с расширением универсальности назначения робота [21]. В качестве примера, когда выполняемые роботом операции обеспечиваются четырьмя степенями свободы, на рис. 1-5 приведена схема манипулятора, работающего в подвижной системе прямоугольных координат, связанной с поворотным столом 1. Рука 2 имеет три степени свободы, соответствующие обозначенным на рисунке направлениям возможных перемещений, четвертая степень свободы обеспечивается поворотом стола 1. Кисть 3 жестко связана с рукой и имеет дополнительное движение зажима и освобождения перемещаемой детали схватом 4. Соответственно работа манипулятора обеспечивается механизмами и приводами подъема руки, горизонтального перемещения кисти и поворота стола. Дополнительный привод обеспечивает работу схвата.

Более сложным примером может служить конструктивная схема манипулятора универсального промышленного робота, имеющего девять степеней свободы (рис. 1-6). Манипулятор подвешен на тележке 1, перемещающейся по балке 2, имеющей возможность горизонтального перемещения по рельсам 3 вдоль обслуживаемой зоны. Рука манипулятора 4, как показано на рисунке стрелками, может перемещаться относительно тележки по вертикали и имеет три шарнирных сочленения (а, б, в), в которых она может сгибаться, оставаясь в одной плоскости. Кисть 5, несущая схват 6, может перемещаться вдоль оси руки 4 и вращаться вокруг этой оси. В данном случае рабочие движения манипулятора обеспечиваются механизмами поворота звеньев руки относительно шарниров а, б, в с двигателями 7, 8, 9, связанными с шарнирами через червячные 10, 11, 12 и цепные 13, 14, 15 передачи; механизмами перемещения кисти 16 с двигателем 17 и реечной передачей 18, вращения кисти с двигателем 19 и механизмом схвата с двигателем 20.

Уместно сопоставить рассмотренные примеры робо-

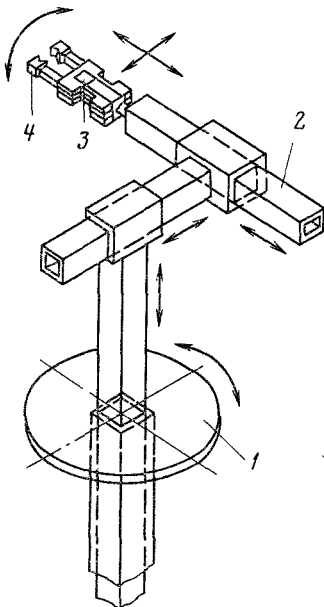


Рис. 1-5. Схема манипулятора с четырьмя степенями свободы.

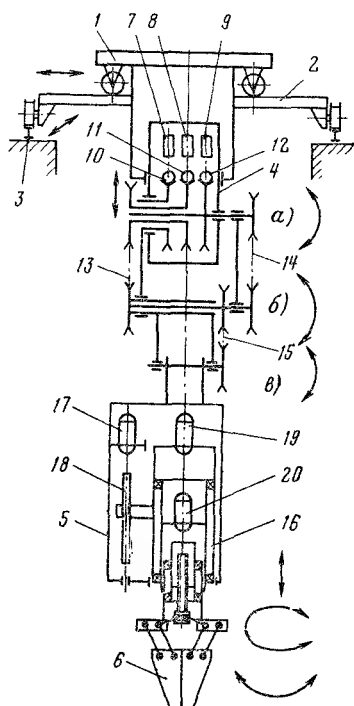


Рис. 1-6. Схема подвешенного манипулятора.

тов с кранами и экскаваторами. Очевидна общность этих устройств, так как краны и экскаваторы, как следует из изложенного, относятся к классу промышленных координатных манипуляторов, и их рабочие движения обслуживаются однотипными по назначению и режимам работы механизмами. В то же время ясна и специфика промышленных роботов, проявляющаяся в большей сложности и своеобразии конструкций и больших возможностях реализации сложных пространственных перемещений схвата.

Подъемники циклического действия представляют собой стационарные подъемные установки циклического действия, предназначенные для подъема грузов (грузовые подъемники), или грузов и людей (грузопассажирские подъемники), или только людей (пассажирские подъемники или лифты). Представление о конструктивных исполнениях различных подъемных установок дают примеры конструктивных схем, приведенные на рис. 1-7.

На рис. 1-7, *а* приведена схема одноконцевой наклонной шахтной подъемной установки. Ее основным элементом является установленная в машинном зале 1 подъемная лебедка 2, которая с помощью каната 5 производит подъем и спуск партии вагонеток 3 по наклонному пути 4.

Двухконцевая шахтная подъемная установка, схема которой приведена на рис. 1-7, *б*, имеет подъемную лебедку 1, отличающуюся от одноконцевой наличием ветвей подъемного каната 2 и 3, каждая из которых несет подъемный сосуд — в данном варианте клетки 4 и 5. При одном направлении вращения барабана лебедки поднимается клеть 4 и одновременно опускается клеть 5, при противоположном — наоборот. В рассматриваемом случае использование двух подъемных сосудов позволяет повысить производительность машины в 2 раза и одновременно уменьшить требуемую мощность привода за счет устранения холостой нагрузки, обусловленной собственным весом клетки.

При большой глубине шахты и соответственно большой длине подъемных канатов габариты барабанов недопустимо возрастают. При этих условиях более удобным является использование лебедки с канатоведущим шкивом трения. В качестве примера на рис. 1-7, *в* приведена конструктивная схема пассажирского лифта, двухконцевая лебедка которого 1 имеет вместо барабана канатоведущий шкив. Подъемный канат (обычно три-четыре ветви), на одном конце которого подвешена кабина лифта 2, а на другом — противовес 3, переброшен через канатоведущий шкив. Усилие от канатоведущего шкива к кана-

ту передается за счет трения между стенками ручьев и уложенными в них ветвями подъемных канатов. Кабина лифта 2 и противовес 3 перемещаются по направляющим 4 и 5 в сквозной шахте 6, огражденной стенами или металлической сеткой.

Приведенный обзор не исчерпывает всего многообразия конкретных установок общепромышленного применения, работающих в циклическом режиме. Определенной спецификой

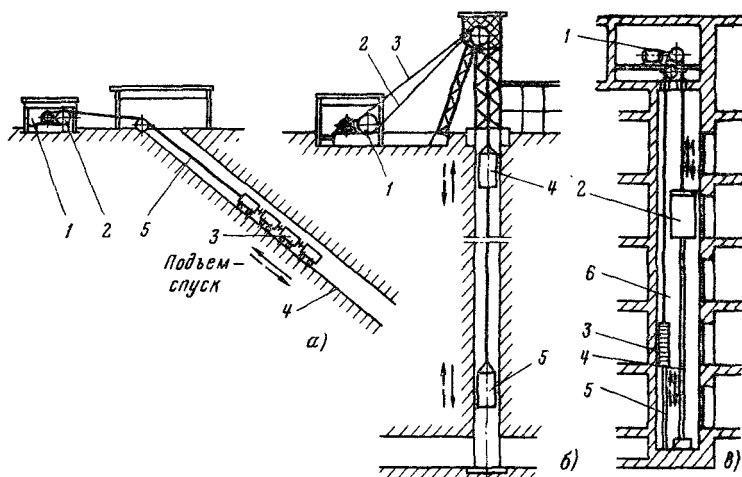


Рис. 1-7. Конструктивные схемы подъемников.

обладают подъемно-транспортные машины и специальные манипуляторы в металлургической промышленности (клешевые коловцевые краны, кантователи, подъемные механизмы, обслуживающие доменный процесс, загрузочные машины), подъемно-транспортные машины типа маятниковых канатных дорог и др. Однако рассмотренных примеров достаточно для выделения типовых общепромышленных механизмов циклического действия, к которому мы перейдем после рассмотрения машин непрерывного режима работы.

1-3. ОБЗОР ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

На основании рассмотренной в § 1-1 классификации можно заключить, что к числу общепромышленных установок непрерывного действия относится большая группа машин и ме-

ханизмов, включающая в себя различные конвейеры, эскалаторы, кольцевые канатные дороги, вертикальные ковшовые элеваторы (нории), многокабинные подъемники, центробежные насосы, вентиляторы, компрессоры и воздуходувки, а также насосы и компрессоры поршневого типа. Все эти машины и механизмы, исключая компрессоры, объединены общностью назначения, так как их основной функцией является транспортировка людей, штучных и сыпучих грузов, а также жидкостей и газов. Важная роль, которую играют общепромышленные механизмы непрерывного действия как средства механизации и автоматизации поточно-транспортных систем, определяется в первую очередь простотой и эффективностью их режима работы. Непрерывность действия, с одной стороны, является фактором, обеспечивающим более высокую производительность машин, а с другой — определяет простоту и высокую надежность применяемых систем электропривода и автоматизации их рабочих процессов. Поэтому во всех случаях, когда технология позволяет организовать непрерывные поточно-транспортные системы, использование механизмов непрерывного действия дает значительный экономический эффект.

Конвейеры являются наиболее распространенными механизмами непрерывного транспорта сыпучих и штучных материалов. В зависимости от типа тягового элемента конвейеры подразделяются на три группы: ленточные, цепные и канатные.

В подавляющем большинстве ленточных конвейеров (рис. 1-8, а) лента 6 одновременно выполняет функции несущего и тягового органов. В конструкцию такого конвейера входят следующие основные элементы: приводной барабан 1; натяжной барабан 7; отводной барабан 4; подвижные опорные элементы — ролики 5. Приводной барабан совместно с редуктором 2 и двигателем 3 образует приводную станцию. Натяжной барабан совместно с устройством 8, создающим усилие на его оси, образует натяжное устройство, или натяжную станцию. По сравнению с другими типами конвейеров, предназначенных для транспортировки сыпучих грузов, ленточный конвейер характеризуется наибольшими скоростью и производительностью. Современные ленточные конвейеры, работающие на открытых разработках полезных ископаемых, обеспечивают производительность до 20 тыс. т/ч при скорости ленты до 6 м/с. Мощность привода наиболее крупных конвейеров может достигать 2000—3000 кВт. Наибольшая длина конвейера в односекционном исполнении в настоящее время достигает 4575 м (Канада). В многосекционном исполнении с промежуточными перегрузочными станциями (рис. 1-8, б) конвейерная трасса может

быть выполнена на любую длину. Известен многосекционный конвейер длиной в 12 км, доставляющий руду от места добычи непосредственно в трюмы грузового судна. Таким образом, обладая высокими скоростями, производительностью и значи-

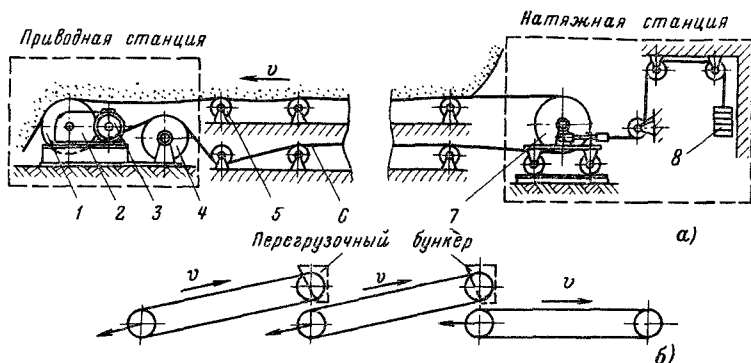


Рис. 1-8. Кинематическая схема односекционного (а) и многосекционного (б) ленточных конвейеров.

тельным радиусом действия, ленточный конвейер в состоянии конкурировать с автомобильным и железнодорожным транспортом.

Цепные конвейеры находят широкое применение в промышленности, обслуживая различные технологические процессы производства: сборочные, красильные, сушильные линии и т. п. На рис. 1-9, а схематично показаны распространенный в промышленности цепной подвесной конвейер и его основные элементы. Изгиб трассы обеспечивается либо звездочками 1-5, либо соответствующим профилем опорного элемента 7, по которому катится опорный ролик 8 с грузозахватывающим устройством 9. Грузозахватывающее устройство 9 с транспортируемым грузом перемещается с помощью тягового органа — цепи б.

Разновидностью цепного конвейера является скребковый конвейер (рис. 1-9, б). Перегородки на несущем элементе (скребки) обеспечивают возможность надежного сцепления с несущим органом различных транспортируемых зерновых и кусковых насыпных грузов. Широкое распространение данный конвейер получил в угледобывающей промышленности, на обогатительных фабриках, предприятиях химической промышленности и т. п.

Пассажирский вариант цепного конвейера — эскалатор, перемещающийся по наклонной трассе, изображен на рис. 1-10.

Жесткий опорный элемент обеспечивает необходимый ступенчатый профиль пластинчатого несущего элемента. Движение ступенек и поручней синхронизировано благодаря общему приводу от двигателя Д через редукторы Р1 и Р2. Эскалатор при-

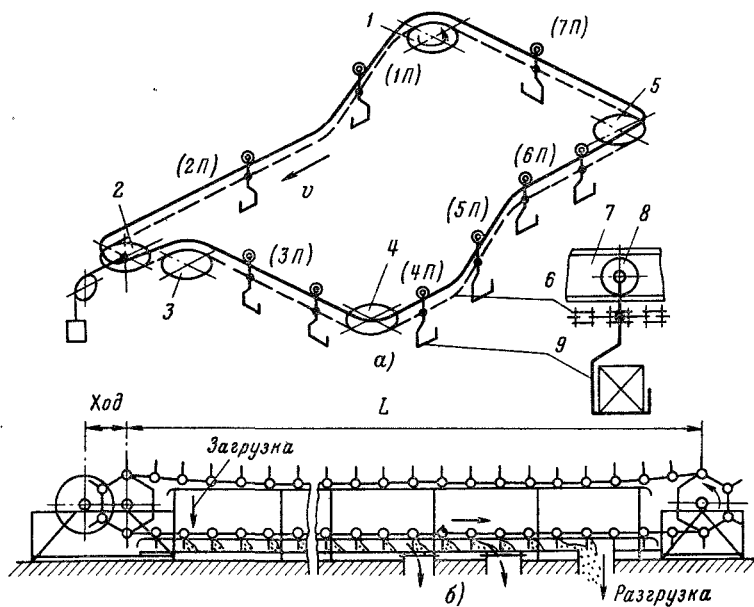


Рис. 1-9. Цепной конвейер-подвесной (а) и скребковый (б).

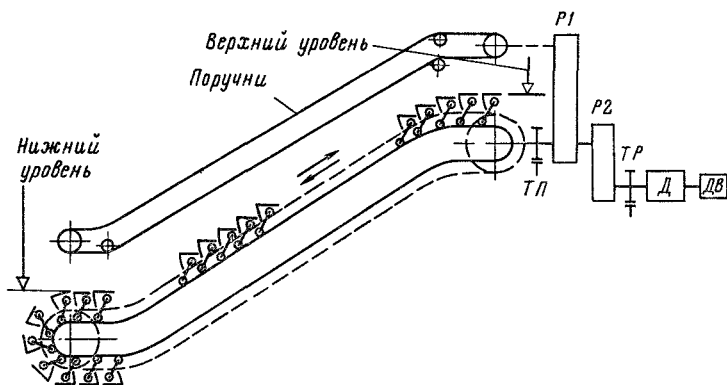


Рис. 1-10. Эскалатор.

меняется в метро, крупных магазинах, учреждениях. Скорость движения эскалаторов составляет $0,4-1,0$ м/с, а производительность обычно не превышает 8100 пассажиров в час. Следует заметить, что попытка повысить производительность эскалатора за счет увеличения скорости его движения выше 1 м/с не дает эффекта, так как при этом уменьшается заполнение лестницы пассажирами, затрудняется вход на лестницу и выход с нее.

В административных зданиях, относительно невысоких (пять — десять этажей), но с большим межэтажным потоком пассажиров как вверх, так вниз, находят применение вертикальные многокабинные подъемники непрерывного действия (рис. 1-11). Число кабин такого подъемника равно увеличенному на два двойному числу этажей. Данное транспортирующее устройство представляет собой пассажирский элеватор, т. е. вертикальный цепной конвейер. Для безопасности входа и выхода пассажиров при непрерывном движении подъемника его скорость ограничивается значением $0,3$ м/с.

Канатный конвейер представляет собой разновидность подвесного конвейера, в котором тяговым и несущим элементами являются канаты. Такой конвейер получил название кольцевой канатной дороги. Схема кольцевой канатной дороги приведена на рис. 1-12. Движение дороги осуществляется с помощью при-

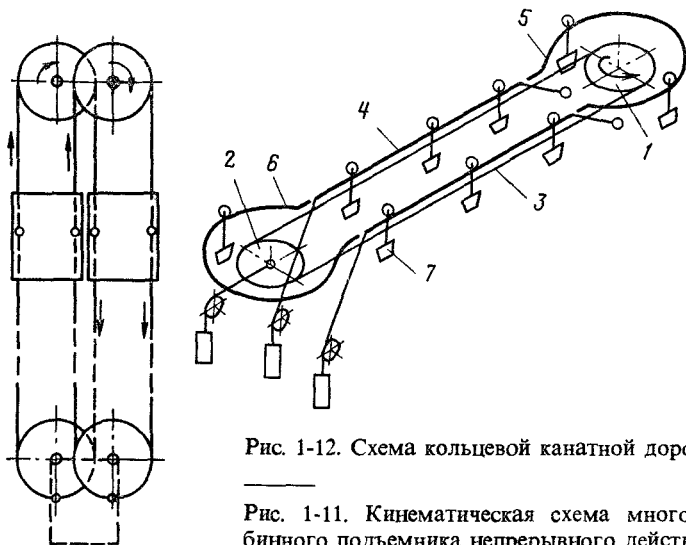


Рис. 1-12. Схема кольцевой канатной дороги.

Рис. 1-11. Кинематическая схема многокабинного подъемника непрерывного действия.

водного шкива 1, а необходимое натяжение каната обеспечивается натяжным устройством 2. При подходе вагонеток 7 к месту загрузки или разгрузки они сходят с несущего каната 4 и переходят на опорный рельс 5 или 6, где происходит автоматическое отцепление от тягового каната 3. После загрузки или выгрузки вагонетки самоходом переходят с опорного рельса на несущий канат и автоматически сцепляются с тяговым канатом. Скорость кольцевых канатных дорог обычно не превышает 3,3 м/с, а длина в многосекционном варианте может достигать нескольких десятков километров.

Используя канаты, можно освободиться от сооружений по всей трассе массивной станины, заменив ее несколькими удерживающими опорами. Благодаря этому канатные дороги способны успешно конкурировать с автомобильным и железнодорожным транспортом в горных, лесных и заболоченных местностях, где их сооружение и эксплуатация оказываются более рентабельными, чем прокладка и эксплуатация автомобильных или железных дорог. Канатные дороги эффективно применяются при строительстве гидротехнических сооружений и ряда других промышленных объектов, на крупных горных разработках, а также как средство пассажирского транспорта, чаще всего, для доставки людей в горы к местам отдыха и занятия спортом.

Кроме рассмотренных вариантов конвейеров массового и универсального применения к механизмам непрерывного транспорта относится ряд специальных установок. Например, качающиеся и вибрационные конвейеры, в которых несущий элемент — желоб или труба — совершает возвратно-поступательное движение с меньшим ускорением вперед и большим — назад. В результате груз перемещается вперед и сбрасывается с несущего элемента. Находят применение также винтовые конвейеры, транспортирующие трубы, установки с пневматической и гидравлической транспортировкой грузов и т. п.

Важное место среди установок непрерывного действия занимает группа механизмов *центробежного и поршневого типов*. К этим механизмам относятся насосы, вентиляторы и компрессоры. Под общим термином «насосы» объединяется многочисленная группа различных механизмов, предназначенная для транспортировки жидких сред. Сюда относятся, например, насосы в системе водоснабжения и канализации, землесосы, специальные насосы для химических сред (щелочей и кислот). Термин «вентиляторы» объединяет большую группу механизмов, осуществляющую по-существу транспортировку газов (шахтные и промышленные вентиляторы, газодувки, дымососы

и т. п.). Наконец, под компрессорами понимаются механизмы, предназначенные для получения и транспортировки сжатого воздуха с целью использования его энергии для создания сильного дутья, для привода пневматических тормозов, рабочих машин (молотов, прессов), инструмента (отбойных молотков) и т. п.

Таким образом, первые две группы механизмов — насосы и вентиляторы имеют одну общую функцию — транспортировать жидкости и газы при непрерывном характере работы. Компрессоры выполняют и другую функцию, осуществляя аккумуляцию энергии в форме энергии сжатого воздуха. С насосами и вентиляторами компрессоры объединяет в основном общность принципа действия и конструкция данных механизмов. Исходя из назначения и характера работы, насосы и вентиляторы можно было бы отнести к механизмам непрерывного транспорта. Однако по принципу работы и конструкции они существенно отличаются от рассмотренных ранее транспортных механизмов и поэтому выделены совместно с компрессорами в отдельную группу механизмов непрерывного действия.

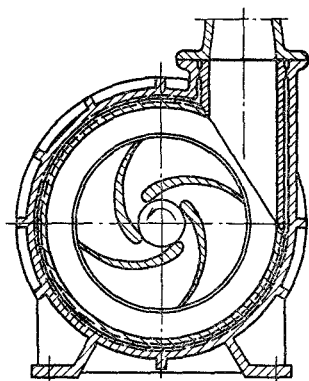


Рис. 1-13. Насос центробежного типа.

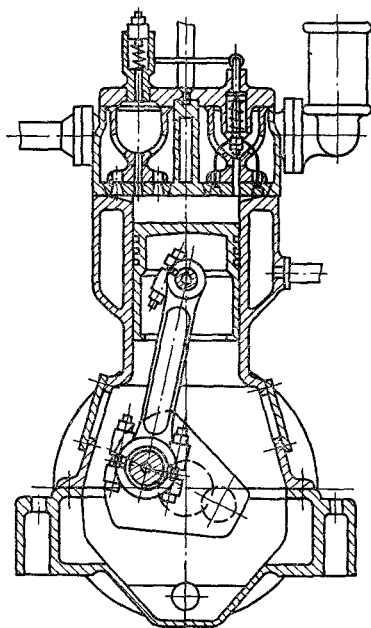


Рис. 1-14. Поршневой компрессор.

По принципу действия насосы, вентиляторы и компрессоры делятся на две основные категории, а именно на механизмы центробежного и поршневого типов. Механизмы центробежного типа (рис. 1-13) обладают высокой подачей (сотни кубометров в минуту жидкости для насосов и сжатого воздуха для компрессоров и тысячи кубометров воздуха для вентиляторов), просты по конструкции и надежны в эксплуатации и поэтому нашли широкое применение.

Механизмы поршневого типа (рис. 1-14) более сложны по конструкции и условиям эксплуатации, но обладают высоким КПД и способны обеспечить сжатие газов до весьма высоких давлений (до 10^5 кПа). Вследствие этого механизмы поршневого типа используются главным образом в качестве компрессоров небольшой и средней производительности и в редких случаях — в качестве небольших насосов.

1-4. ТИПОВЫЕ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Приведенный краткий обзор конструкций установок общепромышленного применения показывает, что несмотря на многообразие частных разновидностей таких машин и механизмов из них можно выделить ограниченное число механизмов, выполняющих в различных конкретных установках одинаковые функции и работающих в одном и том же режиме, к электроприводу которых предъявляются однотипные главные требования.

Различные по конструкции и специализации установки циклического действия, как было установлено, тесно связаны общностью основного назначения: все они предназначены для пространственного перемещения своего рабочего органа с целью выполнения подъемно-транспортных и заданных специальных технологических операций. Особенности конструкций машин определяются сложностью траекторий движения рабочего органа, требуемых для выполнения предусмотренных технологических операций. Они проявляются в первую очередь в числе степеней свободы машины, необходимых для осуществления предусмотренного манипулирования ее рабочим органом. Если по условиям технологии достаточно перемещать рабочий орган по одной пространственной координате, применяются стационарные машины, основным механизмом которых является подъемная или тяговая лебедка.

При необходимости пространственных перемещений схвата по трем координатам требуются три механизма. Так, крюковой или магнитный кран обслуживается подъемной лебедкой,

механизмом передвижения тележки и механизмом передвижения моста. Поворотный кран или одноковшовый экскаватор обычно имеют четыре степени свободы и снабжаются соответственно четырьмя механизмами: подъема, изменения вылета (напора, тяги), поворота и передвижения всей машины. Когда требуется управлять грузозахватывающим устройством, предусматривается дополнительный механизм — лебедка закрывания грейфера, механизм открывания днища ковша и т. п. Наконец, наиболее широкими возможностями перемещения схвата по сложным пространственным траекториям и его ориентации обладают универсальные промышленные роботы. Их манипуляторы имеют наибольшее число степеней свободы и соответствующее число механизмов перемещения и поворота элементов пространственной многозвенной механической системы по этим координатам.

Таким образом, можно заключить, что несмотря на существенные конструктивные особенности различных установок циклического действия их рабочие движения обслуживаются ограниченным числом механизмов, однотипных по принципу действия, основному назначению и выполняемым функциям: подъемными и тяговыми лебедками, а также различными по конструкции механизмами передвижения и поворота. Все эти механизмы являются типовыми, ибо предъявляют к электроприводу и его системе управления ряд характерных общих требований при любом конструктивном исполнении.

Рассмотрение конструктивных особенностей общепромышленных механизмов непрерывного действия показывает, что несмотря на общность режима работы и назначения (исключая компрессоры) по принципу действия их следует разделить на две группы, включив в первую разнообразные подъемно-транспортные машины непрерывного действия и отнеся ко второй насосы, вентиляторы и компрессоры. Основные особенности механизмов непрерывного транспорта достаточно полно выявляются при рассмотрении конвейеров, поэтому конвейер можно рассматривать как типовой общепромышленный механизм непрерывного действия. Вторую группу механизмов непрерывного действия в связи с существенным различием в принципе действия и характере нагрузок полезно разделить на центробежные и поршневые механизмы, также рассматривая их как типовые общепромышленные механизмы непрерывного действия.

Изложенные соображения позволяют представить классификацию изучаемых производственных механизмов в виде схемы, показанной на рис. 1-15, определяющей методику

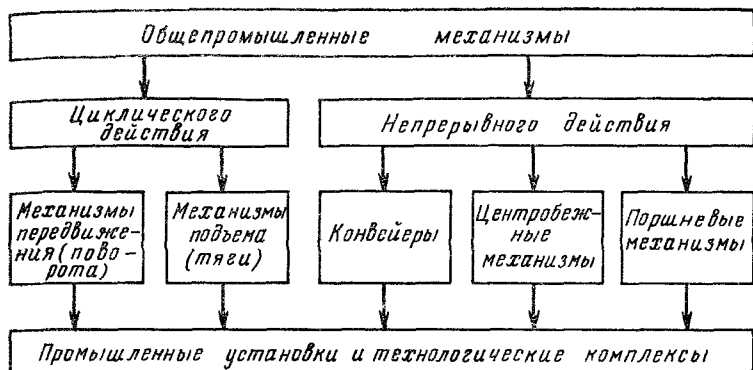


Рис. 1-15. Классификация типовых общепромышленных механизмов.

и структуру данного курса. В соответствии с этой схемой курс состоит из трех частей, в каждой из которых удастся выделить общие вопросы электропривода и автоматизации типовых механизмов данной группы: механизмов циклического действия, механизмов непрерывного транспорта, а также насосов, вентиляторов и компрессоров. Изучение общих вопросов и требований к электроприводу и системам автоматизации рабочих режимов типовых общепромышленных механизмов закрепляется и дополняется анализом примеров схем электропривода основных механизмов конкретных общепромышленных установок, а также рассмотрением электрооборудования ряда технологических комплексов, обслуживаемых типовыми общепромышленными механизмами.

Глава вторая

ЭЛЕКТРОПРИВОД ТИПОВЫХ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

2-1- СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОДЪЕМНЫХ И ТЯГОВЫХ ЛЕБЕДОК

Во всех случаях, когда требуемые перемещения рабочего органа машины по вертикальным и наклонным траекториям достаточно велики — составляют десятки, сотни и даже тысячи метров, наиболее простым и универсальным механизмом пере-

При тяжелом грузозахватывающем устройстве ($G_0/(G_0 + G_{\text{ном}}) \geq 0,1$) значение $M_{\text{ст}2}$ также может быть найдено по общему КПД лебедки $\eta_{\text{л}0}$ при подъеме пустого грузозахватывающего устройства:

$$M_{\text{ст}2} = M_{\text{гр}0}/\eta_{\text{л}0}. \quad (2-3a)$$

При легком грузозахватывающем устройстве ($G_0/(G_0 + G_{\text{ном}}) < 0,1$) определить достаточно точно значение $\eta_{\text{л}0}$ практически невозможно. В этом случае расчет $M_{\text{ст}2}$ целесообразно производить по (2-3), определив предварительно значение $M_{\text{тр}0}$.

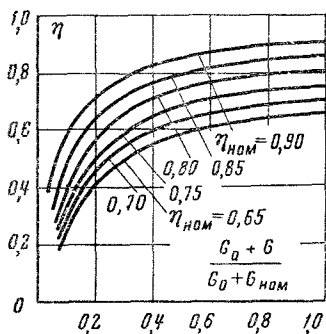


Рис. 2-2. Зависимости $\eta = f[(G_0 + G)/(G_0 + G_{\text{ном}})]$ при $\eta_{\text{ном}} = \text{const}$.

Момент трения в общем случае является сложной функцией скорости и момента $M_{\text{п}}$, передаваемого звеньями кинематической цепи подъемной установки. Однако с приемлемой для практики точностью можно принять $M_{\text{тр}}$ линейно зависящим от передаваемого момента

$$M_{\text{тр}} = M_{\text{х,х}} + bM_{\text{п}},$$

где $M_{\text{х,х}}$ — момент, создаваемый потерями холостого хода;
 b — постоянный коэффициент потерь, пропорциональных передаваемой кинематической цепью нагрузке.

Для режима подъема груза $M_{\text{п}} = M_{\text{гр}}$, и поэтому

$$M_{\text{ст}} = (1 + b) M_{\text{гр}} + M_{\text{х,х}} = M_{\text{гр}}/\eta_{\text{л}}.$$

Отсюда, если задаться значениями $M_{\text{гр}1}$ и $M_{\text{гр}2}$ и найти (например, по кривым на рис. 2-2) соответствующие им значения $\eta_{\text{л}1}$ и $\eta_{\text{л}2}$, то

$$M_{\text{х,х}} = \frac{M_{\text{гр}1}M_{\text{гр}2}}{M_{\text{гр}1} - M_{\text{гр}2}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{л}2}} - \frac{1}{\eta_{\text{л}1}} \right);$$

$$b = \frac{1}{M_{\text{гр1}} - M_{\text{гр2}}} \left(\frac{M_{\text{гр1}}}{\eta_{\text{л1}}} - \frac{M_{\text{гр2}}}{\eta_{\text{л2}}} \right) - 1.$$

Полученные таким образом выражения для $M_{\text{хх}}$ и b могут быть использованы для расчета значения $M_{\text{тр}}$ при любой нагрузке и в том числе для определения $M_{\text{тр0}}$ в (2-3).

Статический момент при спуске пустого грузозахватывающего устройства равен:

$$M'_{\text{ст2}} = M_{\text{гр0}} - M'_{\text{тр0}}, \quad (2-4)$$

где $M'_{\text{тр0}}$ — момент потерь при спуске пустого грузозахватывающего устройства.

Здесь момент нагрузки двигателя в зависимости от веса грузозахватывающего устройства может быть либо движущим, либо тормозным. При тяжелом грузозахватывающем устройстве $M_{\text{гр0}} > M'_{\text{тр0}}$, момент $M'_{\text{ст2}}$ является движущим (тормозной спуск) и его значение, полагая $M'_{\text{тр0}} = M_{\text{тр0}}$, можно найти по формуле

$$M'_{\text{ст2}} = M_{\text{гр0}} (2 - 1/\eta_{\text{л0}}). \quad (2-4a)$$

При легком грузозахватывающем устройстве возможно соотношение $M_{\text{гр0}} < M'_{\text{тр0}}$, при котором потери трения в механизме преодолеваются совместно моментом от веса грузозахватывающего устройства и движущим моментом двигателя (силовой спуск). В этом случае понятие КПД не имеет физического смысла, и расчет значения $M'_{\text{ст2}}$ необходимо вести по (2-4), учитывая при этом, что $M_{\text{п}} = 0$ и поэтому $M'_{\text{тр0}} = M_{\text{хх}}$.

Соотношения (2-1)–(2-3), (2-3a), (2-4a) определяют пределы изменения нагрузки двигателя в различных режимах работы одноконцевой лебедки. Для каждого направления пределы изменения статической нагрузки тем больше, чем относительно легче грузозахватывающее устройство. Это положение иллюстрируется представленными на рис. 2-3, а зависимостями $M_{\text{ст}}/M_{\text{ст1}} = f(G/G_{\text{ном}})$ для двух случаев. Сплошные кривые соответствуют подъемной лебедке с легкой крюковой подвеской ($G_0/(G_0 + G_{\text{ном}}) \approx 0,02$), штриховые — лебедке экскаватора с ковшом ($G_0/(G_0 + G_{\text{ном}}) \approx 0,4$).

На рис. 2-3, б в координатах ω, M показаны линейные механические характеристики двигателя $M = f(\omega)$ при работе на подъем и спуск и заштрихованы области возможных нагрузок электропривода для лебедки с легким захватывающим устройством. Этот рисунок наглядно показывает несимметричный относительно направления вращения двигателя характер его статической нагрузки.

Все полученные соотношения могут быть использованы для расчета статических нагрузок одноконцевых наклонных подъемных лебедок. При этом вместо веса поднимаемых частей $G_0 + G$ необходимо подставлять соответствующие значения натяжения подъемного каната лебедки F . Усилие в канате уравнивает составляющую силы тяжести $F_{тр}$ и силу со-

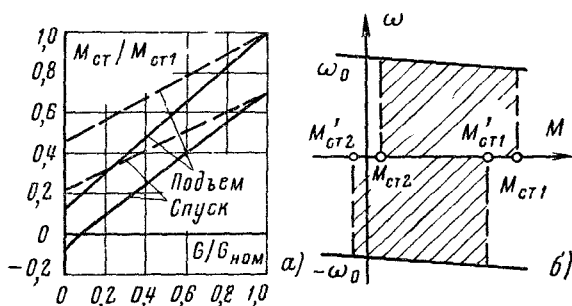


Рис. 2-3. Пределы изменения нагрузок электропривода одноконцевых подъемных лебедок.

противления движению, обусловленную трением $F_{тр}$ (см. рис. 2-1, б):

$$F = F_{тр} \pm F_{тр} = (G + G_0) \sin \beta \pm k_{тр} (G + G_0) \cos \beta. \quad (2-5)$$

Здесь знак плюс соответствует подъему, минус — спуску груза; $k_{тр} = F_{тр}/F_N$ — отношение силы трения к силе нормального давления. В ориентировочных расчетах можно принимать $k_{тр} = 0,08 \div 0,15$.

Экскаваторные подъемные и тяговые лебедки при копании нагружаются не только весом поднимаемого оборудования и грунта, но также и силами сопротивления, возникающими при резании грунта.

Поэтому усилие в канате должно определяться с учетом усилия резания, которое может быть вычислено с помощью методов, описанных в специальной литературе.

Определение статических нагрузок является важным этапом проектирования электропривода. Оно необходимо для построения нагрузочной диаграммы, выбора мощности двигателя и проверки его по нагреву. Характер нагрузок и пределы их изменения в значительной степени определяют режимы работы и выбор схемы электропривода. Так, в дальнейшем будет показано, что несимметричный характер нагрузки одноконцевых подъемных лебедок в большинстве практических случаев выну-

ждает применять несимметричные схемы электропривода, работа которых различна при разных направлениях движения. Изменение нагрузки является основным возмущением при работе электропривода, поэтому без знания пределов, в которых она может изменяться, нельзя обеспечить требуемую точность регулирования координат.

Динамические нагрузки электропривода одноконцевой подъемной лебедки связаны с необходимостью пусков, реверсов и торможений. При заданном ускорении $\epsilon_{\text{доп}}$, которое обычно ограничено технологическими условиями, динамический момент двигателя может быть определен из соотношения

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = J_{\Sigma} \epsilon_{\text{доп}} \quad (2-6)$$

В (2-6) J_{Σ} представляет собой суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции, включающий в себя момент инерции ротора двигателя и приведенный момент инерции всех вращательно и поступательно движущихся масс установки. При рабочей скорости лебедки $v_p < 2$ м/с основную долю в моменте J_{Σ} составляет момент инерции двигателя: $J_{\Sigma} = (1,2 \div 1,6) J_{\text{дв}}$. Для более быстроходных установок влияние приведенных масс механизма более значительно.

Как было отмечено, рассмотренные одноконцевые лебедки являются неуравновешенными механизмами, нагрузка привода которых определяется суммой весов всех поднимаемых частей — каната, захватывающего приспособления и полезного груза. Нетрудно видеть, что такие механизмы постоянно совершают дополнительную работу по подъему захватывающего устройства. При спуске двигатель должен тормозить не только опускающийся полезный груз, но и балластный груз G_0 . Эти факторы приводят к завышению мощности электродвигателя тем более значительно, чем больше вес грузозахватывающего устройства, а также к соответствующему увеличению удельного расхода энергии на единицу полезного груза.

В стационарных подъемных установках этот недостаток устраняется использованием двухконцевых подъемных лебедок. Если установка обслуживает только два уровня, вес подъемного сосуда уравновешивается весом второго такого же подъемного сосуда (см. рис. 1-7, б). При этом достигается также увеличение производительности установки примерно вдвое, так как операция подъема груза совмещается со спуском пустого подъемного сосуда.

Если установка должна обслуживать несколько уровней, например этажей многоэтажного здания, подобное совмещение

невозможно. В этих случаях вместо второго подъемного сосуда навешивается балластный контргруз — противовес. Вес противовеса $G_{пр}$ с целью дополнительного снижения требуемой мощности двигателя выбирают больше веса подъемного сосуда G_0 . При этом уравнивается и часть полезного груза

$$G_{пр} = G_0 + \alpha G_{ном}, \quad (2-7)$$

где α — коэффициент уравнивания.

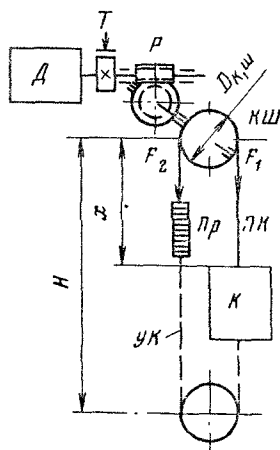


Рис. 2-4. Кинематическая схема двухконцевой подъемной лебедки. Д — двигатель; Т — тормоз; Р — редуктор; КШ — канатопроводящий шкив; К — кабина; Пр — противовес; УК — уравнивающий канат.

В качестве примера на рис. 2-4 представлена кинематическая схема двухконцевой лифтовой лебедки с червячным редуктором и канатопроводящим шкивом. Результирующее усилие на канатопроводящем шкиве определяется разностью натяжений ветвей подъемного каната (рис. 2-4):

$$F = F_1 - F_2.$$

С учетом сил трения в направляющих кабины $F'_{тр}$ и противовеса $F''_{тр}$, а также веса 1 м подъемного каната q_k натяжения F_1 и F_2 определяются соотношениями:

$$F_1 = G + G_0 + q_k x \pm F'_{тр},$$

$$F_2 = G_{пр} + q_k (H - x) \mp F''_{тр}.$$

С учетом (2-7) результирующее усилие составит:

$$F = G - \alpha G_{ном} + q_k (2x - H) \pm (F'_{тр} + F''_{тр}),$$

где знак плюс соответствует подъему кабины, а минус — спуску.

Результирующее усилие F удобно представить в виде алгебраической суммы активного усилия $F_{гр}$ и реактивного, обус-

довленного трением усилия $F_{\text{тр}}$. Эти составляющие определяют соответственно активную $M_{\text{гр}}$ и реактивную $M_{\text{тр}}$ составляющую приведенного к валу двигателя статического момента $M_{\text{ст}}$. Составляющая $M_{\text{тр}}$ должна учитывать, кроме трения в направляющих, все потери на трение в подъемной лебедке. Тогда

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{гр}} + M_{\text{тр}} = \frac{[G + q_k(2x - H) - \alpha G_{\text{ном}}] D_{\text{к,ш}}}{2i_p} + M_{\text{тр}}. \quad (2-8)$$

Из соотношения (2-8) следует, что статический момент зависит от загрузки кабины и от коэффициента уравнивания α . Кроме того, при большой высоте подъема H на статический момент может оказывать существенное влияние вес ветвей каната. При этом в соответствии с (2-8) и схемой на рис. 2-4 момент $M_{\text{ст}}$ является функцией пути.

Если высота подъема невелика, составляющая $q_k(2x - H) \approx 0$. Тогда при подъеме номинального груза ($G = G_{\text{ном}}$) и пустой кабины ($G = 0$) статический момент можно определить с помощью соотношений:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{ст1}} &= M_{\text{гр}} + M_{\text{тр}} = \frac{(1 - \alpha) G_{\text{ном}} D_{\text{к,ш}}}{2i_p \eta_{\text{л,ном}}}; \\ M_{\text{ст2}} &= -M_{\text{гр}} + M_{\text{тр}} = -\frac{\alpha G_{\text{ном}} D_{\text{к,ш}}}{2i_p} \eta_{\text{л,ном}} \end{aligned} \right\} \quad (2-9)$$

где $\eta_{\text{л,ном}}$ — КПД подъемной установки с учетом трения в направляющих, соответствующий номинальной нагрузке.

Статический момент при спуске

$$\left. \begin{aligned} M'_{\text{ст1}} &= M_{\text{гр}} - M_{\text{тр}} = \frac{(1 - \alpha) G_{\text{н}} D_{\text{к,ш}}}{2i_p} \eta_{\text{л,ном}}; \\ M'_{\text{ст2}} &= -M_{\text{гр}} - M_{\text{тр}} = -\frac{\alpha G_{\text{н}} D_{\text{к,ш}}}{2i_p \eta_{\text{л,ном}}} \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

Влияние коэффициента уравнивания α на требуемую мощность двигателя можно оценить с помощью среднеквадратичного момента нагрузки $M_{\text{ск}}$, задавшись определенным циклом работы. Примем, например, что цикл состоит из подъема номинального груза и спуска пустой кабины.

Полагая $t_{\text{д}} = t_{\text{с}} = t_p$, с помощью (2-9) и (2-10) получаем:

$$M_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{M_{\text{ст1}}^2 + M_{\text{ст2}}^2}{2}} = \frac{G_{\text{ном}} D_{\text{к,ш}}}{2i_p \eta_{\text{л,ном}}} \sqrt{\frac{(1 - \alpha)^2 + \alpha^2}{2}}. \quad (2-11)$$

Значение $\alpha = \alpha_{\text{опт}}$, при котором имеет место минимальное значение $M_{\text{ск}}$, можно определить, приравняв нулю производную подкоренного выражения в (2-11):

$$\frac{d}{d\alpha}(1 - 2\alpha + 2\alpha^2) = 0; \alpha_{\text{опт}} = 0,5.$$

На рис. 2-5 представлены графики работы двигателя при $\alpha = 0$ (штриховые линии 1) и при $\alpha = 0,5$ (сплошные линии 2). Из (2-11) следует, что при $\alpha = 0$ момент $M_{\text{ск}}$ больше, чем при

$\alpha = 0,5$, в 1,41 раза. Сравнивая этот результат и графики на рис. 2-5, можно сделать важный вывод, что требуемая мощность двигателя при одинаковом среднем значении момента минимальна при равномерной (постоянной) нагрузке. Оптимальное значение α зависит от параметров цикла работы и от потерь на трение в установке. С учетом этого принимаемые при проектировании значения коэффициента уравнивания для разных установок лежат в пределах $\alpha = 0,4 \div 0,6$.

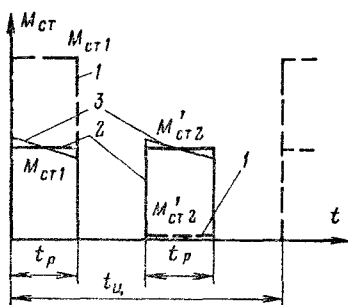


Рис. 2-5. Графики $M_{\text{ст}} = f(t)$ при различной степени уравниваемости.

При большой высоте подъема H на статический момент

в соответствии с (2-8) оказывает значительное влияние неуравновешенный вес подъемного каната. Этот вес изменяется в функции координаты x (см. рис. 2-4) и нарушает достигаемую выбором $\alpha = \alpha_{\text{опт}}$ равномерность нагрузки (график 3 на рис. 2-5). За счет этого требуемая мощность двигателя, как было показано выше, увеличивается. Поэтому при большой высоте подъема обычно прибегают к уравниванию веса подъемного каната с помощью компенсационного (уравнивающего) каната УК, показанного на рис. 2-4 штриховой линией. Для таких установок соотношения (2-9) и (2-10) применимы при любой высоте подъема.

Следует заметить, что в связи с очевидными преимуществами уравнивание используется и в нестационарных машинах с несколькими степенями свободы и в манипуляторах промышленных роботов. Примером может служить показанный на рис. 1-2, б подвижный противовес, уравнивающий часть нагрузки электропривода подъема стрелы.

Из (2-9) и (2-10) видно, что при $\alpha = 0,5$ максимальные и минимальные нагрузки как по значению, так и по характеру одинаковы при любом направлении движения. Об этом можно судить по представленным на рис. 2-6, а примерным зависимостям $M/M_{ст1} = f(G/G_{ном})$ при $\alpha = 0,5$. Возможные пределы изменения нагрузок двухконцевой подъемной лебедки при $\alpha = 0,5$ и достаточно высоким КПД представлены в координатах ω , M на рис. 2-6, б. Сравнивая соответствующие графики на рис. 2-6 и 2-3, можно заключить, что нагрузки двухконцевых

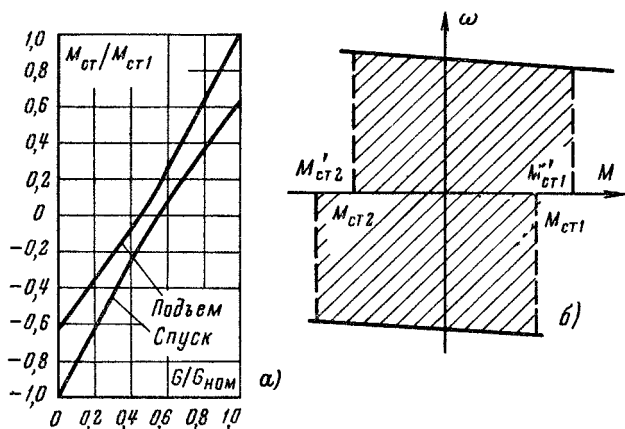


Рис. 2-6. Пределы изменения нагрузок электропривода двухконцевой лебедки.

подъемных лебедок изменяются в более широких пределах и симметричны относительно направления движения механизма. Соответственно при проектировании таких установок используются симметричные схемы электропривода.

При расчете двухконцевых подъемных лебедок, в которых вместо противовеса используется второй подъемный сосуд, можно пользоваться полученными выше соотношениями, полагая $\alpha = 0$.

Динамические нагрузки двухконцевых подъемных установок определяются суммарным приведенным моментом инерции установки и допустимым ускорением в соответствии с (2-6). Здесь важно иметь в виду, что суммарный момент инерции зависит от суммы всех поступательно движущихся масс:

$$J_{\Sigma} = J_{дв} + J_{вр} + (m_{пр} + m_{п,с} + m_{гр} + m_{к}) \frac{v^2}{\omega^2}, \quad (2-12)$$

где $J_{вр}$ — приведенный момент инерции всех вращающихся масс лебедки;
 $m_{пр}$, $m_{п.с}$, $m_{гр}$, m_k — массы соответственно противовеса, подъемного сосуда, груза, подъемного и компенсационного канатов.

Так как мощность двигателя определяется разностью концевых нагрузок, а момент инерции связан с суммой их масс, особенностью двухконцевых подъемных лебедок является большой момент инерции механизма, превышающий в 2–5 раз момент инерции двигателя.

2.2. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ И ПОВОРОТА

Кинематические схемы механизмов передвижения и поворота представлены на рис. 2-7. Для механизмов передвижения, работающих на горизонтальном пути в производственном помещении, приведенный к валу двигателя статический момент, обусловленный силами трения, можно вычислить по формуле

$$M_{ст} = \frac{k_p(G + G'_0) \left(\mu \frac{d_{ц}}{2} + f \right)}{i_p \eta_m}, \quad (2-13)$$

где G'_0 — общий вес незагруженного механизма;

μ — коэффициент трения в опорах ходовых колес;

f — коэффициент трения качения ходовых колес;

η_m — КПД передач механизма;

$d_{ц}$ — диаметр цапф (подшипников) колес;

k_p — коэффициент, учитывающий трение реборд колес о рельсы, возникающее вследствие возможного перекоса конструкции моста или тележки.

Численные значения коэффициентов, входящих в (2-13), приведены в приложении, причем значения k_p в табл. П-6 соответствуют наибольшим встречающимся на практике значениям коэффициентов трения реборд колес о рельсы.

Как следует из (2-13), изменения $M_{ст}$ вызываются изменениями веса G перемещаемого полезного груза, а также изменениями условий трения в кинематических звеньях механизма. Если общий вес механизма G'_0 невелик в сравнении с весом номинального полезного груза $G_{ном}$, что имеет место для ме-

ханизмов передвижения тележек мостовых, козловых кранов и подобных им установок, то определяющее влияние оказывают изменения веса полезного груза (прямая 1 на рис. 2-8, а). Для механизмов передвижения более тяжелых конструкций, например мостовых кранов, влияние полезного груза на статические нагрузки привода невелико (прямая 2 на рис. 2-8, а). Поэтому при проектировании электроприводов таких механизмов следует иметь в виду изменения и других факторов, в частности трения в передачах и реборд колес о рельсы. Точному расчету эти изменения не поддаются. Их влияние можно учитывать ориентировочно, снижая расчетные минимальные нагрузки на 20–30%.

В соответствии с кинематической схемой, приведенной на рис. 2-7, б, при горизонтальном положении платформы и отсут-

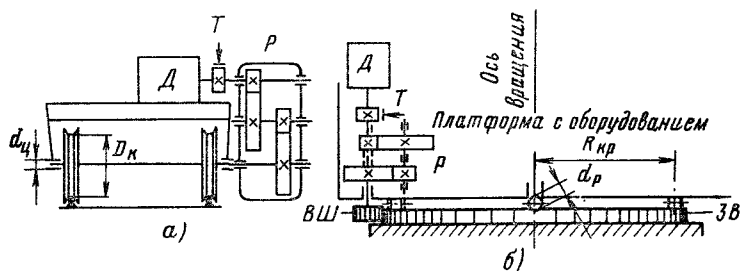


Рис. 2-7. Кинематическая схема механизмов передвижения (а) и поворота (б).

Д — двигатель; Т — тормоз; Р — редуктор; ВШ — ведущая шестерня; ЗВ — зубчатый венец.

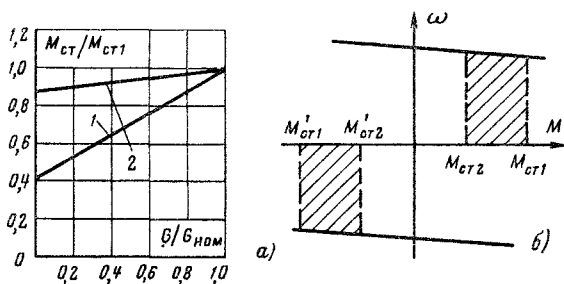


Рис. 2-8. Пределы изменения нагрузок электроприводов механизмов передвижения и поворота без учета ветровой нагрузки и уклона в координатах $M_{ст}/M_{ст1}$, $G/G_{ном}$ (а) и ω , M (б).

ствии воздействия ветра статический момент механизма поворота можно определить так:

$$M_{ст} = k_p \frac{2f(G + G_0) D_{кр}}{d_p i \eta}, \quad (2-14)$$

где k_p — коэффициент, учитывающий трение реборд колес опорных тележек о рельсы или роликов опорного роликового круга о направляющие, а также трение в центральной цапфе оси вращения платформы;

$D_{кр}$ — диаметр роликового круга;

d_p — диаметр роликов (в случае опорных тележек — диаметр их колес);

f — коэффициент трения качения роликов или ходовых колес.

Зависимость статического момента электропривода поворота от веса полезного груза G выражается также прямой 2 на рис. 2-8, а, так как для подавляющего большинства машин вес поворотной платформы с оборудованием много больше веса полезного груза.

Статические нагрузки установок, работающих на открытом воздухе, могут существенно изменяться при наличии уклона или воздействия ветра. В общем случае сила сопротивления движению для механизма передвижения может быть представлена в виде алгебраической суммы (влияние уклона показано на рис. 2-1, б):

$$F_c = F_{тр} + F_{тр} + F_v = (G_0 + G) \sin \beta + k_{тр} (G_0 + G) \cos \beta + p_v S_v, \quad (2-15)$$

где

$$k_{тр} = 2k_p \left(\mu \frac{d_{ц}}{2} + f \right) / D_k;$$

D_k — диаметр ходового колеса;

β — угол уклона;

p_v — ветровое давление, принимаемое обычно при выборе мощности электродвигателя равным 150–250 Па;

S_v — площадь парусности сооружения.

Площадь парусности сооружения может быть найдена по выражению

$$S_v = k_{сп} S_{в,к} + S_{в,г},$$

где $k_{сп}$ — коэффициент сплошности конструкции, численно равный 0,3–0,6 для ферм и 0,7–0,8 для механизмов;

$S_{в,к}$, $S_{в,г}$ — площадь, ограниченная контуром конструкции и груза.

Статический момент в случае, когда результирующая сила направлена против движения, т. е. является тормозной, следует определять по формуле

$$M_{ст} = F_c D_k / 2i \eta_m$$

а если по движению, то по формуле

$$M_{ст} = F_c D_k \eta_m / 2i$$

Уклон и ветровая нагрузка в значительной степени расширяют пределы изменения нагрузок и изменяют их характер. При наличии уклона нагрузка становится несимметричной аналогично рис. 2-3, б. Ветровая нагрузка может иметь любое направление, и при большой парусности пределы изменения статической нагрузки могут охватывать как двигательный, так и тормозной режимы (см. рис. 2-6, а, б). Кроме того, для механизмов поворота статический момент, обусловленный ветром, при постоянной силе ветра зависит от угла поворота платформы.

Важнейшей особенностью механизмов передвижения и поворота является большая механическая инерция, влияние которой тем больше, чем тяжелее движущееся сооружение и чем выше скорость движения. Приведенный к валу двигателя момент инерции движущихся масс установки для механизмов передвижения и поворота кранов и для механизмов поворота экскаваторов в 2—20 раз больше собственного момента инерции двигателя. Поэтому для таких механизмов при большой частоте включений динамические нагрузки определяют необходимую мощность двигателя, а статические нагрузки невелики в сравнении с динамическими. Так, электропривод поворота экскаватора-драглайна типа ЭШ-15/90 при углах поворота 90—110° работает только в переходных режимах пуска и торможения. Статическая нагрузка этого механизма не превышает 10% номинального момента двигателя.

При небольшом моменте инерции механизма динамический момент в основной своей части обусловлен ускорением ротора двигателя и нагружает передачи механизма незначительно. Иные условия складываются в электроприводах инерционных механизмов. Здесь основной нагрузкой передач является динамическая нагрузка, обусловленная ускорением масс поворотной платформы. Передача динамических усилий вызывает дополнительные потери в редукторе, которые желательно в расчетах учитывать, если динамические нагрузки передач соизмеримы со статическими или превышают их. Приведенный динамический

момент для пуска можно определять из соотношения

$$M_{\text{дин}} = J_{\text{дв}} \epsilon_{\text{доп}} + J_{\text{м}} \frac{\epsilon_{\text{доп}}}{\eta_{\text{м}}}, \quad (2-16)$$

а для торможения

$$M_{\text{дин}} = J_{\text{дв}} \epsilon_{\text{доп}} + J_{\text{м}} \epsilon_{\text{доп}} \eta_{\text{м}}, \quad (2-17)$$

где $J_{\text{м}} = J_{\Sigma} - J_{\text{дв}}$ — приведенный к валу двигателя момент инерции всех поступательно и вращательно движущихся масс механизма.

У механизмов передвижения и поворота установок, в которых груз или ковш подвешен на канате и может колебаться подобно маятнику, динамический момент $M_{\text{дин}}$ является переменной величиной. Груз (или ковш) при пусках и торможениях раскачивается, поэтому кран (поворотная платформа) и груз движутся в разных фазах колебания с разными ускорениями (см. § 2-5). В расчетах для построения нагрузочных диаграмм и выбора двигателей эти колебания обычно не учитывают, определяя с помощью (2-16) и (2-17) средний динамический момент по среднему ускорению и моменту инерции.

2-3. ВЫБОР ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ МЕХАНИЗМОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Электроприводы механизмов циклического действия работают в повторно-кратковременном режиме, характерной особенностью которого являются частые пуски и остановки двигателя. Из курса теории электропривода известно, что потери энергии в переходных процессах непосредственно зависят от момента инерции электропривода J_{Σ} , основную долю которого, если исключить инерционные механизмы, составляет момент инерции двигателя $J_{\text{дв}}$. Поэтому при повторно-кратковременном режиме желательно применять двигатели, которые при требуемых мощности и угловой скорости имеют возможно меньший момент инерции $J_{\text{дв}}$.

По условиям нагрева допустимая нагрузка двигателя при повторно-кратковременном режиме выше, чем при длительном. При пуске с повышенной статической нагрузкой двигатель должен развивать и повышенный пусковой момент, превосходящий статический на значение требуемого динамического момента. Поэтому в повторно-кратковременном режиме работы требуется более высокая перегрузочная способность двигателя, чем при длительном. Требование высокой перегрузочной способности определяется также и необходимостью преодоления кратковременных механических перегрузок, возникающих при отрыве грузов, черпании грунта и т. п.

Наконец, условия нагревания и охлаждения двигателей при повторно-кратковременном режиме отличаются от аналогичных условий при длительном режиме. Особенно сильно это отличие проявляется у двигателей с самовентиляцией, так как количество охлаждающего воздуха, поступающего в двигатель, зависит от его скорости. Во время переходных процессов и пауз теплоотдача двигателя ухудшается, что оказывает существенное влияние на допустимую нагрузку двигателя.

Все эти условия определяют необходимость использования в электроприводах механизмов циклического действия специальных двигателей, номинальным режимом которых является повторно-кратковременный режим, характеризующийся определенной номинальной продолжительностью включения

$$ПВ_{ном} = \frac{t_p}{t_p + t_0} 100\%,$$

где t_p , t_0 — соответственно время работы и время паузы.

В повторно-кратковременном режиме при работе с номинальной нагрузкой температура двигателя колеблется около допустимого значения, увеличиваясь во время работы и снижаясь во время паузы. Очевидно, отклонения температуры от допустимой тем выше, чем больше при данной ПВ продолжительность цикла $t_{ц} = t_p + t_0$ и чем меньше постоянная времени нагрева двигателя T_n . Чтобы ограничить возможную максимальную температуру двигателя, ограничивают допустимую длительность цикла. Для отечественных серий двигателей повторно-кратковременного режима допустимое время цикла установлено равным 10 мин. Таким образом, эти двигатели рассчитаны на рабочий цикл, график которого для стандартных продолжительностей включения ($ПВ = 15, 25, 40$ и 60 и 100%) показан на рис. 2-9. С увеличением ПВ номинальная мощность двигателя уменьшается.

Промышленность выпускает ряд серий двигателей повторно-кратковременного режима: асинхронные крановые с короткозамкнутым ротором серии МТКФ и с фазным ротором серии МТФ; аналогичные металлургические серий МТКН и МТН; постоянного тока серии Д (в экскаваторном исполнении серии ДЭ). Для машин указанных серий характерна удлиненная форма ротора (якоря), обеспечивающая снижение момента инерции. Для уменьшения потерь, выделяющихся в статорной обмотке в переходных процессах, двигатели серий МТКФ и МТКН имеют повышенное номинальное скольжение $s_{ном} = 7 \div 12\%$. Перегрузочная способность двигателей крановой

и металлургической серий составляет 2,3–3 при $PВ = 40\%$, что при $PВ = 100\%$ соответствует $\lambda = M_{кр}/M_{ном100\%} = 4 \div 5,5$.

В крановых двигателях переменного тока за основной номинальный принят режим с $PВ = 40\%$, а в двигателях постоянного тока – кратковременный режим длительностью 60 мин (наряду с режимом $PВ_{ном} = 40\%$). Номинальные значения мощности двигателей крановой и металлургической серий при $PВ_{ном} = 40\%$ лежат в пределах: 1,4–22 кВт для серий МТГ и МТКФ; 3–37 кВт и 3–160 кВт для серий соответственно МТКН и МТН; 2,4–106 кВт для серии Д. Продуваемые двигатели серии Д выполняются на номинальную мощность от 2,5 до 185 кВт при $PВ_{ном} = 100\%$. Двигатели с короткозамкнутым ротором могут иметь многоскоростное исполнение с двумя или тремя отдельными обмотками на статоре: серии МТКН с числом полюсов 6/12, 6/16 и 6/20 и номинальной мощностью от 2,2 до 22 кВт при $PВ_{ном} = 40\%$; серии МТКФ с числом полюсов 4/12, 4/24 и 4/8/24 и номинальной мощностью от 4 до 45 кВт при $PВ_{ном} = 25\%$. Намечается производство новой серии 4МТ асинхронных крановых и металлургических двигателей в диапазоне мощностей 2,2–200 (220) кВт при $PВ_{ном} = 40\%$.

Использование двухдвигательного привода вдвое расширяет пределы применения перечисленных типов электрических машин. При больших требуемых мощностях применяются асинхронные двигатели серий А, АО, АК, ДАФ и др., а также двигатели постоянного тока единой серии П в специализированных модификациях, например в экскаваторном исполнении ПЭ, МПЭ, для лифтов МПЛ и т. п.

Выбор двигателей крановых и металлургических серий наиболее просто осуществляется в тех случаях, когда действительный график работы его совпадает с одним из номинальных, показанных на рис. 2-9. В каталогах и справочной литературе указываются номинальные данные двигателей при $PВ$ -15, 25, 40, 60 и 100%. Поэтому при работе привода с постоянной статической нагрузкой $P_{ст}$ при номинальном цикле не представляет трудностей подобрать по каталогу двигатель ближайшей мощности из условия $P_{ном} \geq P_{ст}$.

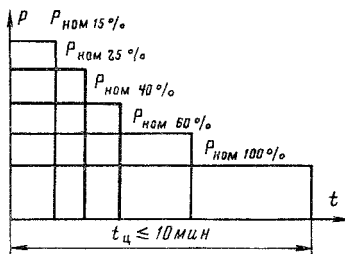
Однако реальные циклы, как правило, сложнее, нагрузка двигателя на различных участках цикла оказывается различной, а продолжительность включения отличается от номинальной. При таких условиях выбор двигателя производится по эквивалентному графику, приведенному в соответствие с одним из номинальных на рис. 2-9. С этой целью вначале определяется эквивалентная по нагреву постоянная нагрузка при действительной $PВ_d$, которая далее пересчитывается к стандартной

продолжительности включения $PВ_{ном}$. Пересчет может быть произведен с помощью соотношений:

$$\left. \begin{aligned} I_{ПВ, ном} &= I_{ПВ, д} \sqrt{ПВ_{д} / ПВ_{ном}} ; \\ M_{ПВ, ном} &= M_{ПВ, д} \sqrt{ПВ_{д} / ПВ_{ном}} ; \\ P_{ПВ, ном} &= P_{ПВ, д} \sqrt{ПВ_{д} / ПВ_{ном}} . \end{aligned} \right\} \quad (2-18)$$

Соотношения (2-18) являются приближенными, так как не учитывают двух важных факторов, изменяющихся при изменении ПВ и существенно влияющих на нагрев двигателя. Первый

Рис. 2-9. Номинальный цикл работы двигателя для повторно-кратковременного режима.



фактор — количество теплоты, выделяющееся в двигателе за счет постоянных потерь. Это количество теплоты возрастает при увеличении ПВ и уменьшается при переходе на меньшие значения ПВ. Соответственно при переходе к большим ПВ нагрев возрастает и наоборот. Второй фактор — условия вентиляции двигателей. При самовентилизации условия охлаждения в периоды работы в несколько раз лучше, чем в периоды пауз. Поэтому с возрастанием ПВ условия охлаждения улучшаются, с уменьшением — ухудшаются.

Сопоставляя влияние этих двух факторов, можно заключить, что оно противоположно и в той или иной степени взаимно компенсируется. Благодаря этому для современных серий приближенные соотношения (2-18) дают достаточно правильный результат, если их использовать только для пересчета на ближайшую к $PВ_{д}$ номинальную продолжительность включения $PВ_{ном}$.

Из теории электропривода известно, что используемые при выборе двигателя методы средних потерь и эквивалентных величин имеют поверочный характер, так как требуют знания ряда параметров предварительно выбранного двигателя. При предварительном выборе во избежание многократных ошибок необходимо учитывать особенности конкретного механизма. Для общепромышленных механизмов циклического действия

можно указать три наиболее характерных случая предварительного выбора двигателя:

1. Цикл работы механизма задан, причем динамические нагрузки оказывают незначительное влияние на нагрев двигателя.

2. Цикл работы механизма задан и известно, что динамические нагрузки существенно влияют на нагрев двигателя.

3. Цикл работы механизма заданием не определен.

Первый случай наиболее характерен для механизмов с малыми инерционными массами — одноконцевых подъемных и тяговых лебедок. Оценить влияние динамических нагрузок на нагрев двигателя можно путем сравнения продолжительности пуска $t_{\text{п}}$ с продолжительностью установившегося режима работы $t_{\text{уст}}$. Если $t_{\text{п}} \ll t_{\text{уст}}$, выбор двигателя можно произвести по нагрузочной диаграмме исполнительного механизма. По этой нагрузочной диаграмме определяется среднеквадратичный момент нагрузки $M_{\text{ск, ПВ, д}}$ с помощью формул (2-18) пересчитывается к ближайшей номинальной ПВ_{ном} и далее определяется требуемая мощность двигателя по заданной рабочей скорости ω_r :

$$P_{\text{тр}} = k_3 M_{\text{ск, ПВ, ном}} \omega_r.$$

При этом приближенный учет влияния динамических нагрузок производится путем введения в формулу коэффициента запаса $k_3 = 1,1 \div 1,5$. С увеличением отношения $t_{\text{п}}/t_{\text{уст}}$ коэффициент запаса нужно увеличивать ориентировочно, полагая, что при $t_{\text{п}}/t_{\text{уст}} < 0,05$ следует брать меньшее из указанных значений, а при $t_{\text{п}}/t_{\text{уст}} > 0,2 - 0,3$ — большее. Предварительно выбранный двигатель необходимо проверить по нагреву одним из методов, рассмотренных в курсе теории электропривода [2, 4], а также по перегрузочной способности из условия:

$$M_{\text{max}} = M_{\text{ст1}} + M_{\text{дин}} \leq M_{\text{доп}},$$

где $M_{\text{доп}}$ — допустимый момент кратковременной перегрузки.

Для двигателей постоянного тока момент $M_{\text{доп}}$ ограничивается условиями коммутации тока на коллекторе:

$$M_{\text{доп}} = \lambda M_{\text{ном}},$$

где λ — перегрузочная способность двигателя по каталожным данным.

Для асинхронных двигателей при определении $M_{\text{доп}}$ необходимо учитывать возможность снижения напряжения сети на 10%. Так как критический момент $M_{\text{кр}}$ пропорционален квадрату напряжения, то

$$M_{\text{доп}} = (U_c/U_{\text{с, ном}})^2 \lambda M_{\text{ном}} = 0,81 \lambda M_{\text{ном}}.$$

Кроме того, асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором необходимо таким же путем проверять по пусковому моменту.

Пример 2-1. Необходимо выбрать асинхронный двигатель с фазным ротором для грузового лифта с двухконцевой подъемной лебедкой, кинематическая схема которой представлена на рис. 2-4. Технические данные лифта: скорость $v_{\text{ном}} = 0,75$ м/с; диаметр канатоведущего шкива $D_{\text{к,ш}} = 0,8$ м; передаточное число редуктора $i_p = 53$; масса кабины $m_0 = 3200$ кг; масса номинального груза $m_{\text{ном}} = 1500$ кг; коэффициент уравнивания $\alpha = 0,45$; КПД лифта с учетом трения в направляющих $\eta_{\text{л,ном}} = 0,7$; требуемое ускорение при пуске $a = 0,5$ м/с². Цикл работы: подъем номинального груза; пауза; спуск пустой кабины; пауза. Число циклов в час $N_{\text{ц}} = 65$, высота подъема $H = 9$ м.

Время пуска и торможения при заданном ускорении:

$$t_{\text{п}} = t_{\text{т}} = v_{\text{ном}}/a = 0,75/0,5 = 1,5 \text{ с.}$$

Путь, проходимый с установившейся скоростью:

$$H_{\text{уст}} = H - 2 \frac{v_{\text{ном}} t_{\text{п}}}{2} = 9 - 2 \frac{0,75 \cdot 1,5}{2} = 7,88 \text{ м.}$$

Время движения с установившейся скоростью:

$$t_{\text{уст}} = H_{\text{уст}}/v_{\text{ном}} = 7,88/0,75 = 10,5 \text{ с.}$$

Так как $t_{\text{п}} \ll t_{\text{уст}}$, предварительный выбор двигателя можно осуществить по нагрузочной диаграмме исполнительного механизма $M = f(t)$. Рассчитаем величины, необходимые для ее построения.

Статический момент при подъеме номинального груза определим по (2-9):

$$M_{\text{ст1}} = \frac{(1 - \alpha) G_{\text{ном}} D_{\text{к,ш}}}{2 i_p \eta_{\text{л,ном}}} = \frac{(1 - 0,45) 14700 \cdot 0,8}{2 \cdot 53 \cdot 0,7} = 87,3 \text{ Н} \cdot \text{м,}$$

где $G_{\text{ном}} = m_{\text{ном}} g = 1500 \cdot 9,81 = 14700$ Н.

Статический момент при спуске пустой кабины по (2-10):

$$M_{\text{ст2}} = - \frac{\alpha G_{\text{ном}} D_{\text{к,ш}}}{2 i_p \eta_{\text{л,ном}}} = - \frac{0,45 \cdot 14700 \cdot 0,8}{2 \cdot 53 \cdot 0,7} = - 71,5 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

При торможении двигатель отключается от сети и накладывается механический тормоз. Следовательно, время работы двигателя при подъеме и спуске:

$$t_{\text{п1}} = t_{\text{п2}} = t_{\text{уст}} + t_{\text{п}} = 10,5 + 1,5 = 12 \text{ с.}$$

Время цикла:

$$t_{\text{ц}} = 3600/N_{\text{ц}} = 55,5 \text{ с.}$$

Действительная продолжительность включения

$$\text{ПВ}_{\text{д}} = \frac{t_{\text{п1}} + t_{\text{п2}}}{t_{\text{ц}}} 100\% = \frac{12 + 12}{55,5} \cdot 100\% = 43,5\%.$$

Среднеквадратичный момент нагрузки при $P_{вд}$:

$$M_{ск, Пв, д} = \sqrt{\frac{M_{ст1}^2 t_{p1} + M_{ст2}^2 t_{p2}}{t_{p1} + t_{p2}}} = \sqrt{\frac{87,3^2 \cdot 12 + 71,5^2 \cdot 12}{12 + 12}} = 80 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Ближайшая каталожная продолжительность включения $P_{вном} = 40\%$. Пересчитаем $M_{ск, Пв, д}$ к этому значению ПВ по формуле (2-18):

$$M_{ск, Пв, ном} = M_{ск, Пв, д} \sqrt{\frac{P_{вд}}{P_{вном}}} = 80 \sqrt{\frac{43,5}{40}} = 83,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Требуемая мощность двигателя при $P_{вном} = 40\%$:

$$P_{тр 40\%} = k_3 M_{ск, Пв, ном} \omega_p = 1,4 \cdot 83,5 \cdot 99 \cdot 10^{-3} = 11,5 \text{ кВт},$$

где

$$\omega_p = 2 v_{ном} i_p / D_{к, ш} = 2 \cdot 0,75 \cdot 53 / 0,8 = 99 \text{ рад/с}.$$

Коэффициент запаса k_3 , учитывающий динамические нагрузки, принят равным 1,4, так как $t_{п}/t_{уст} = 0,143$.

Выбираем по каталогу двигатель типа МТФ311-6, который при $P_{вном} = 40\%$ имеет следующие номинальные данные: $P_{ном} = 11 \text{ кВт}$; $n_{ном} = 945 \text{ об/мин}$; $\lambda = M_{кр}/M_{ном} = 2,8$; $J_{дв} = 0,225 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Эти данные необходимо использовать для определения суммарного момента инерции электропривода J_{Σ} , построения нагрузочной диаграммы двигателя $M = f(t)$, проверки двигателя по нагреву и по перегрузочной способности.

Второй случай характерен для механизмов с большими инерционными массами — тяжелых и быстроходных механизмов передвижения и поворота, но может иметь место и в других случаях при большой частоте включений. Оценку влияния динамических нагрузок и здесь можно произвести, сравнивая время переходного процесса и установившейся работы. Если они соизмеримы или $t_{п} > t_{уст}$, пренебрегать динамическими нагрузками нельзя даже при предварительном выборе двигателя. В этом случае необходимо для предварительного выбора построить приближенную нагрузочную диаграмму двигателя, задавшись по аналогии с действующими установками его моментом инерции. Если $J_{дв} \ll J_{м}$, ошибка в значении $J_{дв}$ не может оказать существенного влияния на правильность выбора и, кроме того, необходимые уточнения в любом случае дает последующий поверочный расчет.

Наконец, третий случай характерен для механизмов универсального назначения, для которых построить конкретный цикл работы затруднительно. Примером могут служить механизмы нормального мостового крана небольшой грузоподъемности, который может использоваться в различных производственных помещениях. Основой для выбора двигателя в таких случаях

может служить расчетный цикл, при котором на первом рабочем участке t_{p1} двигатель работает с максимальной нагрузкой $M_{ст1}$, а на втором t_{p2} с минимальной нагрузкой $M_{ст2}$. Если известно, что влияние динамических нагрузок на нагрев двигателя данного механизма невелико, можно определить среднеквадратичный (эквивалентный по нагреву) момент нагрузки, полагая $t_{p1} = t_{p2}$:

$$M_{ск} = \sqrt{(M_{ст1}^2 + M_{ст2}^2)/2}.$$

Требуемая мощность двигателя при заданной рабочей скорости определяется соотношением

$$P_{тр} = k_3 M_{ск} \omega_p.$$

Выбор двигателя по каталогу производится из условия $P_{тр} \leq P_{ном}$ при заданной для механизма расчетной продолжительности включения $ПВ_{ном}$.

Для крановых механизмов правилами Госгортехнадзора установлены следующие режимы работы, определяемые совокупностью условий их эксплуатации: легкий — Л ($ПВ_{ном} = 15 \div 25\%$, число включений в час $h \leq 60$ 1/ч), средний — С ($ПВ_{ном} = 25 \div 40\%$, $h \leq 120$ 1/ч), тяжелый — Т ($ПВ_{ном} = 40\%$, $h \leq 240$ 1/ч) и весьма тяжелый — ВТ ($ПВ_{ном} = 60\%$, $h \leq 600$ 1/ч). В настоящее время подготавливается стандарт, предусматривающий пятую категорию режима: особо тяжелый — ОТ ($ПВ_{ном} = 100\%$, $h > 600$ 1/ч).

Наличие этих данных, основанных на статистическом материале, позволяет в случае необходимости конкретизировать условный цикл работы механизма, принятый выше в качестве расчетного. Действительно, определяется время работы

$$t_{p1} = t_{p2} = \frac{3600}{h} \frac{ПВ_{ном}}{100}, \quad (2-19)$$

что дает возможность вести предварительный выбор двигателя теми же путями, что и в первых двух рассмотренных выше случаях. Это особенно важно тогда, когда можно предполагать, что влияние динамических нагрузок на нагрев двигателя существенно.

Пример 2-2. Необходимо выбрать двигатель постоянного тока независимого возбуждения для механизма передвижения моста универсального крана грузоподъемностью $m_{ном} = 10$ т, предназначенного для работы с $ПВ_{ном} = 25\%$ и $h = 60$ 1/ч.

Технические данные: скорость $v_{ном} = 1,5$ м/с; требуемое ускорение $a = 0,2$ м/с²; масса моста крана $m_m = 29$ т; масса тележки $m_t = 3,5$ т; массой крюковой подвески в данном расчете можно пренебречь; передаточное число редуктора $i_p = 15$; диаметр ходовых колес $D_k = 0,6$ м,

диаметр цапф (подшипников ходовых колес) $d_{\text{ц}} = 0,08$ м; КПД передач механизма $\eta_{\text{м}} = 0,8$; коэффициент трения реборд ходовых колес $k_{\text{р}} = 1,5$; коэффициенты трения $\mu = 0,1$, $f = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м.

Время пуска и торможения:

$$t_{\text{п}} = t_{\text{т}} = v_{\text{ном}}/a = 1,5/0,2 = 7,5 \text{ с.}$$

Время работы по (2-19):

$$t_{\text{р1}} = t_{\text{р2}} = \frac{3600}{60} \frac{25}{100} = 15 \text{ с.}$$

Время движения с установившейся скоростью

$$t_{\text{уст}} = t_{\text{р1}} - (t_{\text{п}} + t_{\text{т}}) = 15 - 2 \cdot 7,5 = 0.$$

В данном случае электропривод работает в неустановившихся режимах, а механизм имеет большую массу и высокую скорость движения. Известно, что при таких данных момент инерции двигателя $J_{\text{дв}}$ обычно меньше, чем приведенный к его валу момент инерции механизма $J_{\text{м}}$. Поэтому в соответствии с рекомендацией для второго случая можно записать:

$$J_{\Sigma} = k_3 J_{\text{м}}$$

где $k_3 < 2$ — коэффициент запаса, учитывающий неизвестный на этапе предварительных расчетов момент инерции двигателя.

Примем ориентировочно $k_3 = 1,3$ и оценим суммарный момент инерции привода:

$$\begin{aligned} J_{\Sigma} &= k_3 (m_{\text{ном}} + m_{\text{т}} + m_{\text{м}}) \rho^2 = \\ &= 1,3 (10 + 3,5 + 29) \cdot 10^3 \cdot 0,02^2 = 22,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \end{aligned}$$

где $\rho = D_{\text{к}}/2i_{\text{р}} = 0,6/2 \cdot 15 = 0,02$ м.

Полученная оценка J_{Σ} дает возможность рассчитать приближенную нагрузочную диаграмму двигателя. С помощью (2-13) определим моменты статической нагрузки при движении с грузом $M_{\text{ст1}}$ и при движении без груза $M_{\text{ст2}}$:

$$\begin{aligned} M_{\text{ст1}} &= \frac{k_{\text{р}} (G_{\text{ном}} + G_0) \left(\mu \frac{d_{\text{ц}}}{2} + f \right)}{i_{\text{р}} \eta_{\text{м}}} = \\ &= \frac{1,5 (98,1 + 319) \cdot 10^3 (0,1 \cdot 0,04 + 0,6 \cdot 10^{-3})}{15 \cdot 0,8} = 240 \text{ Н} \cdot \text{м}, \end{aligned}$$

где $G_{\text{ном}} = m_{\text{ном}} g = 10 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 98,1 \cdot 10^3$ Н;

$$G_0 = (m_{\text{м}} + m_{\text{т}}) g = (29 + 3,5) \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 319 \cdot 10^3 \text{ Н};$$

$$M_{\text{ст2}} = \frac{1,5 \cdot 319 \cdot 10^3 (0,1 \cdot 0,04 + 0,6 \cdot 10^{-3})}{15 \cdot 0,8} = 183 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент двигателя при пуске с грузом:

$$M_{п1} = M_{ст1} + J_{\Sigma} \varepsilon = 240 + 22,1 \cdot 10 = 461 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $\varepsilon = a/\rho = 0,2/0,02 = 10 \text{ 1/с}^2$.

Момент двигателя при торможении с грузом:

$$M_{т1} = M_{ст1} - J_{\Sigma} \varepsilon = 240 - 22,1 \cdot 10 = 19 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент двигателя при пуске без груза:

$$M_{п2} = M_{ст2} + J'_{\Sigma} \varepsilon = 183 + 16,9 \cdot 10 = 352 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $J'_{\Sigma} = 1,3 \cdot (m_{\text{м}} + m_{\text{т}}) \rho^2 = 1,3 \cdot (29 + 3,5) \cdot 10^3 \cdot 0,02^2 = 16,9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Момент двигателя при торможении без груза:

$$M_{т2} = M_{ст2} - J'_{\Sigma} \varepsilon = 183 - 16,9 \cdot 10 = 14 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Эквивалентный момент двигателя при $\text{ПВ}_{\text{ном}} = 25\%$ ($t_{\text{уст}} = 0$):

$$M_{\text{эк}25\%} = \sqrt{\frac{(M_{п1}^2 + M_{п2}^2) t_{\text{п}} + (M_{т1}^2 + M_{т2}^2) t_{\text{т}}}{2 t_{\text{п}} + 2 t_{\text{т}}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(461^2 + 352^2) \cdot 7,5 + (19^2 + 14^2) \cdot 7,5}{2 \cdot 7,5 + 2 \cdot 7,5}} = 290 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Требуемая номинальная скорость двигателя:

$$\omega_{\text{н}} = v_{\text{н}}/\rho = 1,5/0,02 = 75 \text{ рад/с}.$$

Требуемая мощность двигателя при $\text{ПВ}_{\text{ном}} = 25\%$:

$$P_{\text{тр}25\%} = M_{\text{эк}25\%} \omega_{\text{ном}} = 290 \cdot 75 = 21,8 \cdot 10^3 \text{ Вт}.$$

По каталогу выбираем двигатель типа Д806 с номинальными данными: $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, $P_{\text{ном}} = 20 \text{ кВт}$ при $\text{ПВ}_{\text{ном}} = 25\%$, $n_{\text{ном}} = 705 \text{ об/мин}$, $J_{\text{дв}} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Нетрудно видеть, что выбранный двигатель имеет меньший момент инерции, чем принятый в начале расчета $J'_{\text{дв}} = J_{\Sigma} - J_{\text{м}} = 22,1 - 22,1/1,3 = 5,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Фактическое значение суммарного момента инерции электропривода:

$$J_{\Sigma} = k_{\text{Г}} J_{\text{дв}} + J_{\text{м}} = k_{\text{п}} J_{\text{дв}} + (m_{\text{ном}} + m_{\text{м}} + m_{\text{т}}) \rho^2 = 1,2 \cdot 1 + (10 + 29 + 3,5) 10^3 \cdot 0,02^2 = 18,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где $k_{\text{п}} = 1,2$ — коэффициент, учитывающий момент инерции передач, соединительных муфт и тормозных шкивов привода.

Так как фактический момент инерции привода на 18% меньше принятого предварительно, анализируя ход расчета, можно установить, что выбранный двигатель имеет небольшой запас мощности. При необходимости можно проверить правильность его выбора, повторив расчет с фактическим значением J_{Σ} и с учетом потерь, возникающих при передаче звеньями кинематической цепи динамических усилий в соответствии с (2-16) и (2-17).

2-4. ВЛИЯНИЕ УПРУГИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ НА ДИНАМИКУ МЕХАНИЗМОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

При рассмотрении динамических нагрузок подъемных и тяговых лебедок, механизмов передвижения и поворота механические связи между движущимися массами системы предполагались абсолютно жесткими. Из курса теории электропривода [4] известно, что представление механической части электропривода жестким приведенным звеном отражает действительный характер движения масс в системе только в среднем, так как не учитывает влияния упругости реальных механических связей. Из-за конечной жесткости этих связей механическая часть электропривода представляет собой упругую систему, приложение к которой управляющего (момент двигателя) или возмущающих (нагрузки) воздействий вызывает колебания связанных масс, увеличивающие максимальные нагрузки связей и осложняющие точность обработки требуемых траекторий движения рабочего органа машины.

Более детальный анализ кинематических схем типовых общепромышленных механизмов циклического действия показывает, что их характерной особенностью является, с одной стороны,

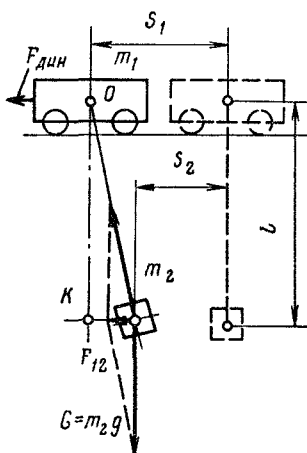


Рис. 2-10. Расчетная механическая схема электропривода механизма передвижения, приведенная к поступательному движению.

повышенная податливость механических связей, а с другой — наличие рабочих режимов, динамику которых без учета упругих связей анализировать невозможно. Повышенная податливость ряда механизмов обусловлена наличием упругости канатов, связывающих рабочий орган с приводом, удлиненных по конструктивным соображениям валов, особенно в случаях, когда двигатель удален от механизма и передача крутящего момента к конечному элементу кинематической цепи осуществляется длинным жестким или гибким валом. Последние характерны для электроприводов манипуляторов промышленных роботов. К числу рабочих процессов, требующих учета упругостей, относятся режимы стопорения и выбора зазоров, рассматриваемые ниже.

Наиболее наглядным внешним проявлением влияния податливости механических связей является раскачивание грузов, подвешенных на канатах, возникающее в каждом переходном процессе пуска или торможения механизма передвижения или поворота. Рассмотрим процесс пуска механизма передвижения, схема которого приведена на рис. 2-10. Механизм представлен в виде двух поступательно движущихся масс, одна из которых перемещается по горизонтальному пути, а вторая подвешена к первой в точке O на невесомой нити. Массой m_1 представлена сумма масс механизма и привода, связанных жестко; m_2 — масса подвешенного на канате грузозахватывающего устройства с грузом (крюк, магнит, грейфер, ковш экскаватора-драглайна и т. п.). Пуск происходит под действием динамического усилия $F_{\text{дин}}$, представляющего собой разность постоянного движущего усилия, создаваемого двигателем, и постоянного тормозного усилия, обусловленного силами трения. Эти величины могут быть рассчитаны по формулам:

$$m_1 = J_1/\rho^2; \quad m_2 = J_2/\rho^2; \quad F_{\text{дин}} = \frac{M - M_{\text{ст}}}{\rho},$$

где $\rho = v/\omega$ — радиус приведения от вала двигателя со скоростью ω к скорости механизма v .

Движение рассматриваемой системы во время пуска описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} F_{\text{дин}} - F_{12} &= m_1 \frac{d^2 S_1}{dt^2}; \\ F_{12} &= m_2 \frac{d^2 S_2}{dt^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2-20)$$

Если пренебречь изменением высоты подвеса, т. е. принять $OK \approx l$, можно на основании геометрических соотношений (рис. 2-10) получить следующее выражение [4]:

$$F_{12} = \frac{m_2 g}{l} (S_1 - S_2). \quad (2-21)$$

После преобразований из (2-20) и (2-21) получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{1}{\Omega_{12}^2} \frac{d^3 v_1}{dt^3} + \frac{dv_1}{dt} = \frac{F_{\text{дин}}}{m_1 + m_2}, \quad (2-22)$$

где $\Omega_{12} = \sqrt{g \frac{m_1 + m_2}{m_1 l}}$ — частота свободных колебаний рассматриваемой двухмассовой механической системы.

Уравнение (2-22) можно представить в более общем виде, удобном и для анализа динамики других механизмов, если

привести все входящие в него величины к валу двигателя с помощью радиуса приведения ρ :

$$\frac{1}{\Omega_{12}^2} \frac{d^3 \omega_1}{dt^3} + \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{M_{\text{дин}}}{J_1 + J_2}, \quad (2-23)$$

где

$$\Omega_{12} = \sqrt{c_{12} \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2}} = \sqrt{g \frac{m_1 + m_2}{m_1 l}};$$

c_{12} — приведенная жесткость упругого элемента.

Корни характеристического уравнения соответственно равны: $p_1 = 0$; $p_{2,3} = \pm j\Omega_{12}$. Решение следует искать в виде

$$\omega_1 = At + B \sin \Omega_{12}t + C \cos \Omega_{12}t.$$

Подставляя решение в (2-23), находим:

$$A = \frac{M_{\text{дин}}}{J_1 + J_2} = \varepsilon_{\text{ср}}.$$

Используя начальные условия $(\omega_1)_0 = 0$, $(d\omega_1/dt)_0 = M_{\text{дин}}/J_1$, $(d\omega_2/dt)_0 = 0$, получаем:

$$B = \frac{J_2 M_{\text{дин}}}{J_1 \Omega_{12} (J_1 + J_2)}; \quad C = 0.$$

Решение уравнения (2-23):

$$\omega_1 = \varepsilon_{\text{ср}}t + \frac{J_2 \varepsilon_{\text{ср}}}{J_1 \Omega_{12}} \sin \Omega_{12}t, \quad (2-24)$$

где $\varepsilon_{\text{ср}} = M_{\text{дин}}/(J_1 + J_2)$ — среднее ускорение электропривода.

Выражение для момента в упругом элементе M_{12} можно получить из (2-24) и (2-20), если последнее уравнение записать приведенным к валу двигателя. После преобразований это выражение принимает вид:

$$M_{12} = M_{12\text{ср}}(1 - \cos \Omega_{12}t), \quad (2-25)$$

где $M_{12\text{ср}} = J_2 \varepsilon_{\text{ср}}$.

Для рассматриваемого механизма передвижения усилие F_{12} действующее в переходных процессах, изменяется по тому же закону:

$$F_{12} = m_2 a_{\text{ср}}(1 - \cos \Omega_{12}t).$$

Кривые, соответствующие уравнениям (2-24) и (2-25), представлены на рис. 2-11. Рассматривая эти кривые и полученные соотношения, можно сделать вывод, что в переходных процессах подвешенная масса совершает колебательное движение — раскачивается с частотой, зависящей от высоты подвеса и соотношения масс m_1 и m_2 . Частота максимальна при минимальной высоте подвеса l , но и в этом случае она невелика ($f_{12} =$

$= 0,2 \div 0,3$ Гц). За счет раскачивания груза ускорение привода переменное, оно зависит от фазы колебания массы m_2 .

Раскачивание подвешенной массы проявляется в увеличении нагрузок конструкций механизма и мешает работе операторов, например крановщиков или машинистов экскаваторов-драглайнов, затрудняя установку груза или ковша в намеченном месте. Особенно неблагоприятно раскачивание ковшей с расплавленным металлом, перемещаемых металлургическими и ли-

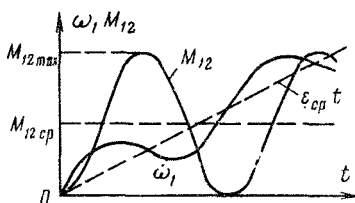


Рис. 2-11. Зависимость ω_1 и $M_{12} = f(t)$ при пуске электропривода механизмов передвижения и поворота с подвешенным грузом.

тейными кранами. Поэтому уменьшение раскачивания подвешенных масс является важной практической задачей.

Как следует из соотношений (2-24) и (2-25), уменьшение амплитуды колебаний масс m_1 и m_2 может быть достигнуто ограничением среднего ускорения привода $\epsilon_{ср}$. Этот способ является наиболее распространенным. Его недостатком является увеличение длительности переходных процессов привода, что в ряде случаев может снижать производительность механизма.

При прочих равных условиях раскачивание груза может быть сведено к минимуму действиями машиниста, если система управления приводом обеспечивает плавное регулирование пускового момента в диапазоне не менее 2:1. В этом можно убедиться, рассматривая процесс пуска на рис. 2-11. Если в момент $t = \pi/\Omega_{12}$, когда отклонение груза максимально, увеличить момент $M_{дин}$ вдвое, уменьшение отклонения груза не произойдет и колебания прекратятся. Дальнейший пуск будет протекать при неизменном отклонении, соответствующем среднему ускорению $\epsilon'_{ср} = 2\epsilon_{ср}$.

Дополнительное уменьшение амплитуды колебаний может быть обеспечено формированием определенного закона изменения во времени динамического усилия $F_{дин}$ (момента $M_{дин}$). В частности, уменьшение раскачивания может быть достигнуто ограничением темпа нарастания динамического момента. Интенсивность нарастания момента можно характеризовать временем его нарастания до требуемого значения, соответствующего допустимому среднему ускорению. При этом зависимость

момента от времени можно записать так:

$$M_{\text{дин}} = \frac{M_{\text{доп}}}{t_1} t. \quad (2-26)$$

Если привести уравнения (2-20) и (2-21) к валу двигателя и затем разрешить их относительно момента в упругом элементе M_{12} , считая момент $M_{\text{дин}}$ переменной величиной, получаем следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{1}{\Omega_{12}^2} \frac{d^2 M_{12}}{dt^2} + M_{12} = \frac{J_2}{J_1 + J_2} M_{\text{дин}}. \quad (2-27)$$

Решая (2-27) с учетом (2-26), можно получить зависимость от времени момента M_{12} , пропорционального деформации упругого элемента, т. е. отклонению груза от вертикали.

$$M_{12} = J_2 \varepsilon_{\text{доп}} \left(\frac{t}{t_1} - \frac{1}{\Omega_{12} t_1} \sin \Omega_{12} t \right), \quad (2-28)$$

где $\varepsilon_{\text{доп}} = M_{\text{доп}}/(J_1 + J_2)$ — среднее допустимое ускорение привода.

Сравнивая (2-25) и (2-28) при $\varepsilon_{\text{ср}} = \varepsilon_{\text{доп}}$ и прочих равных условиях, можно заключить, что ограничение темпа нарастания момента снижает амплитуду раскачивания груза относительно среднего значения в отношении

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{J_2 \varepsilon_{\text{доп}}}{J_2 \varepsilon_{\text{ср}} \Omega_{12} t_1} = \frac{1}{t_1 \Omega_{12}} = \frac{T_{12}}{2\pi t_1},$$

где $T_{12} = 2\pi/\Omega_{12}$ — период свободных колебаний груза.

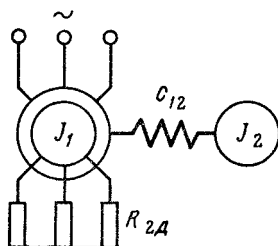
Так, если принять $t_1 = 0,5 T_{12}$, амплитуда может быть снижена в 3,14 раза. Так как частота при минимальной длине подвеса составляет 0,2–0,3 Гц, что соответствует периоду колебаний $T_{12} = 3 \div 5$ с, получение такого эффекта снижения амплитуд колебаний требует увеличения времени нарастания пускового момента электропривода до 1,5–2 с. Как следствие при этом снижается среднее ускорение привода, что при интенсивной работе может отрицательно сказываться на производительности машины. При увеличенной длине подвеса груза этот недостаток проявляется еще в большей степени, так как при этом период колебаний возрастает по сравнению с указанными выше значениями.

Тем не менее ограничение ускорений, предоставление машинисту возможности регулирования момента электропривода в диапазоне не менее 2:1 и автоматическое ограничение темпа его нарастания в переходных процессах в настоящее время являются основными средствами уменьшения раскачивания

подвешенных на канатах грузов при работе механизмов передвижения и поворота. Чем выше требования к плавности и равномерности перемещения груза, тем более жесткие требования предъявляются к электроприводу в отношении ограничения ускорения и темпа изменения момента в переходных процессах.

Некоторые дополнительные возможности уменьшения амплитуд колебаний груза и увеличения затухания возникших ко-

Рис. 2-12. Расчетная электро-механическая схема асинхронного электропривода механизма передвижения (или поворота) с подвешенным грузом.



лебаний дает демпфирующее действие, которое оказывает электропривод благодаря наличию в системе электро-механической связи. В курсе теории электропривода [4] было установлено, что электропривод с линейной механической характеристикой при благоприятных сочетаниях параметров электро-механической системы способен эффективно демпфировать упругие механические колебания за счет поглощения энергии колебаний в виде теплоты в сопротивлениях силовой цепи электропривода или отдачи части этой энергии в питающую сеть. Рассмотрим возможности ограничения раскачивания груза за счет использования этого эффекта. С этой целью исследуем колебательность электро-механической системы асинхронного электропривода механизма передвижения (или поворота), расчетная схема которой приведена на рис. 2-12.

На рис. 2-12 обозначено: J_1 — суммарный момент инерции ротора и жестко с ним связанных элементов механизма; J_2 — приведенный момент инерции груза; c_{12} — жесткость связи механизма с грузом; $R_{2д}$ — добавочное сопротивление в цепи ротора, обеспечивающее возможность изменения жесткости механической характеристики двигателя. Если линеаризовать рабочий участок механической характеристики и пренебречь трением груза о воздух, можно записать следующую систему уравнений, соответствующую схеме на рис. 2-12 [4]:

$$M = M_{к,з} - \beta \omega_1; \quad \int$$

$$\left. \begin{aligned} M - M_{12} - M_{\text{ст1}} &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (2-29)$$

где

$$M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2); \quad \beta = 2M_{\text{кр}}/s_{\text{кр}}\omega_0; \quad \omega_0 = 2\pi f_1/p_{\text{п}};$$

f_1 — частота сети;

$p_{\text{п}}$ — число пар полюсов;

$M_{\text{кр}}, s_{\text{кр}}$ — соответственно критический момент и критическое скольжение двигателя при данном суммарном сопротивлении фазы роторной цепи $R_{2\Sigma}$;

$M_{\text{кз}}$ — момент короткого замыкания ($\omega_1 = 0$).

В качестве прямой оценки колебательности системы в переходных процессах целесообразно принять логарифмический декремент $\lambda = 2\pi\alpha/\Omega$, где α, Ω — действительная и мнимая части пары комплексно сопряженных корней характеристического уравнения системы (2-29). Поэтому для решения поставленной задачи можно ограничиться рассмотрением однородного дифференциального уравнения, которое получим, разрешив (2-29) относительно M_{12} при $M_{\text{кз}} = 0$ и $M_{\text{ст1}} = 0$. Если при этом замечить действительное время t на относительное время $\tau = \Omega_{12}t$, то полученное в результате преобразований (2-29) однородное уравнение можно представить в виде

$$\gamma T_{\text{м1}}\Omega_{12} \frac{d^3 M_{12}}{d\tau^3} + \gamma \frac{d^2 M_{12}}{d\tau^2} + \gamma T_{\text{м1}}\Omega_{12} \frac{dM_{12}}{d\tau} + M_{12} = 0, \quad (2-30)$$

где $\gamma = (J_1 + J_2)/J_1 = J_2/J_1$;

$T_{\text{м1}}$ — электромеханическая постоянная массы с моментом инерции J_1 , $T_{\text{м1}} = J_1/\beta$.

Характеристическое уравнение системы:

$$\gamma\psi(\beta)p^3 + \gamma p^2 + \gamma\psi(\beta)p + 1 = 0, \quad (2-31)$$

где $\psi(\beta) = T_{\text{м1}}\Omega_{12}$ — параметр, монотонно убывающий от ∞ до 0 при изменении β от 0 до ∞ .

Нетрудно видеть, что корни характеристического уравнения (2-31), а следовательно, и логарифмический декремент λ при изменениях β зависят только от соотношения инерционных масс системы γ и от варьируемого параметра $\psi(\beta)$. Если при данных параметрах системы вычислить по формулам Кардана корни уравнения (2-31) для различных значений модуля жестко-

сти механической характеристики β , можно построить обобщенную зависимость $\lambda = f[\psi(\beta)]$, вид которой определяется только данным значением $\gamma = \gamma_1 = \text{const}$ (рис. 2-13, а). При

$\psi(\beta) = 0$ ($\beta = \infty$) демпфирование отсутствует, $p_{1,2} = \pm j \frac{\Omega_{12}}{\sqrt{\gamma}}$;

$\lambda = 0$. Увеличение $\psi(\beta)$ (уменьшение β) вызывает возрастание

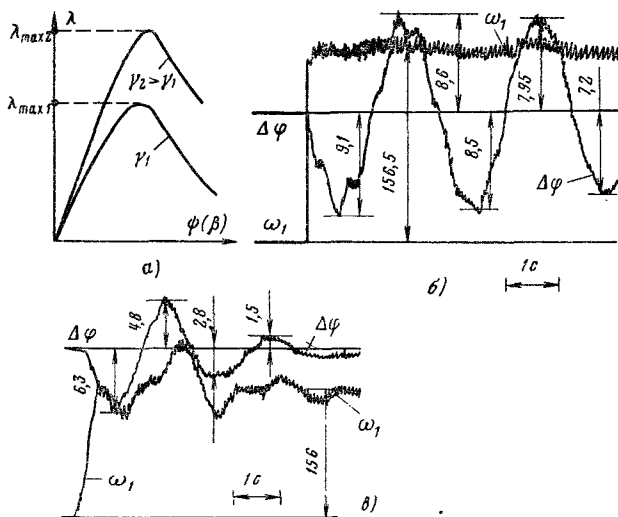


Рис. 2-13. Обобщенные зависимости $\lambda = f[\psi(\beta)]$ (а) и осциллограммы процессов пуска механизма передвижения (б, в).

затухания и при $\psi_{\text{опт}}(\beta)$ имеет место наибольшее значение $\lambda = \lambda_{\text{max}}$. Увеличение γ (кривая при $\gamma = \gamma_2$ на рис. 2-13, а) влечет за собой возрастание максимума логарифмического декремента и при $\gamma \geq 9$, как показывают расчеты, $\lambda = \infty$, т. е. корни становятся действительными и отрицательными числами, и переходные процессы в упругой системе имеют экспоненциальный характер.

Эти известные из теории электропривода положения позволяют проанализировать, какие возможности в отношении уменьшения раскачивания грузов дает использование демпфирующей способности электропривода.

Как следует из кривых на рис. 2-13, а, подбором оптимальной жесткости механической характеристики электропривода можно значительно увеличить затухание колебаний груза, если

его приведенный момент инерции J_2 соизмерим с J_1 , т. е. при $\gamma > 1,5$.

На рис. 2-13, б показана осциллограмма переходного процесса пуска асинхронного электропривода механизма передвижения тележки крана с грузом при $\gamma = 1,7$ при двигателе с короткозамкнутым ротором. Здесь хорошо видно, что скорость двигателя и тележки ω_1 быстро достигает установившегося значения и в дальнейшем в связи с высокой жесткостью механической характеристики практически не меняется, несмотря на значительные колебания груза — кривая $\Delta\varphi = f(t)$. Демпфирование при этом весьма мало, и колебания затухают медленно.

Иные условия складываются при пуске от двигателя с фазным ротором с сопротивлением $R_{2д}$, обеспечивающим оптимальную жесткость, соответствующую $\psi_{\text{опт}}(\beta)$ при данных Ω_{12} и γ (рис. 2-13, в). Здесь в связи с уменьшением модуля жесткости β колебания груза $\Delta\varphi$ вызывают значительные колебания скорости двигателя, энергия колебаний отводится в роторную цепь двигателя и выделяется в ней в виде теплоты. Колебательность при этом резко снижается и раскачивание груза прекращается примерно за 1,5 периода колебаний, логарифмический декремент увеличивается почти в 10 раз.

Таков эффект подбора оптимальной электромеханической связи в системе электропривода за счет выбора соответствующей жесткости механической характеристики. Однако он достигим, как было отмечено, только при $\gamma \geq 1,5$, а для многих механизмов передвижения и поворота $\gamma = 1,1 \div 1,3$. Вторым недостатком является ослабление демпфирования с уменьшением массы перемещаемого груза; при этом также уменьшается γ и, как показано на рис. 2-13, а, максимум λ быстро снижается. Наконец третий недостаток связан с зависимостью демпфирующей способности от длины подвеса груза. Оптимальная жесткость определяется значением $\psi_{\text{опт}}(\beta) = T_{M1\text{опт}}\Omega_{12}$:

$$\beta_{\text{опт}} = J_1\Omega_{12}/\psi_{\text{опт}}(\beta). \quad (2-32)$$

Как следует из (2-32), различной длине подвеса соответствуют различные значения Ω_{12} и $\beta_{\text{опт}}$ при данном значении γ .

Несмотря на эти недостатки, во всех случаях, когда $\gamma > 1,5$, возможность использования демпфирующего действия электропривода следует иметь в виду, особенно при применении простейших разомкнутых систем. В перспективе в электроприводах, управляемых по системе УП-Д, задача ограничения раскачивания грузов будет решена за счет регулирования отклонения груза от вертикали с помощью жесткой и гибкой связи по

отклонению. Решение этой задачи пока вызывает трудности, связанные с отсутствием простых и надежных датчиков отклонений груза.

При рассмотрении динамических процессов в электромеханических системах общепромышленных механизмов циклического действия с учетом упругих связей механическая часть электроприводов, как правило, приводится к двухмассовой расчетной схеме. Поэтому ряд выводов, полученных для процессов раскачивания грузов, полностью справедлив и для упругих колебаний электропривода, обусловленных упругостью кинематических связей. Так, при анализе нагрузок в передачах, обусловленных податливостью связи между двигателем и тележкой (мостом, поворотной платформой) момент инерции J_1 в формулах (2-29) есть момент инерции двигателя, а J_2 — приведенный момент инерции тележки (моста, поворотной платформы). Так как жесткость передач во много раз выше, чем жесткость при раскачивании груза, колебания груза при анализе нагрузок передач можно не учитывать, полагая его отклонение $\Delta\varphi$ постоянным, пропорциональным среднему ускорению привода [см. (2-24)].

Формула (2-25) в связи с этим характеризует нагрузки в передачах или в канате подъемной лебедки, если учесть наличие момента нагрузки $M_{ст2}$, приложенного ко второй массе системы:

$$M_{12} = J_2 \varepsilon_{cp} (1 - \cos \Omega_{12} t) + M_{ст2}. \quad (2-33)$$

Она свидетельствует о том, что колебательные динамические нагрузки являются неблагоприятным фактором, увеличивающим максимальные нагрузки передач по сравнению со средними. Это увеличение характеризуется коэффициентом динамичности:

$$k_{дин} = \frac{M_{12max}}{M_{12cp}} = \frac{2J_2 \varepsilon_{cp} + M_{ст2}}{J_2 \varepsilon_{cp} + M_{ст2}}. \quad (2-34)$$

Наиболее значительное увеличение нагрузок характерно для механизмов, у которых динамический момент $J_2 \varepsilon_{cp} \gg M_{ст2}$. Динамические нагрузки таких механизмов проанализируем более подробно.

2.5. ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ РЕДУКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ИНЕРЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Двухконцевые подъемные лебедки, механизмы передвижения и поворота являются тяжелыми механизмами, приведенный к валу двигателя момент инерции которых превышает момент инерции их двигателя

лей в несколько раз. Наиболее значительными инерционными массами обладают механизмы поворота экскаваторов-драглайнов средней и большой производительности. Приведенный момент инерции этих механизмов превышает момент инерции двигателя в 10–20 раз.

Передачи таких механизмов нагружаются значительными динамическими усилиями при разгоне и торможении инерционных масс, которые могут в несколько раз превышать статические нагрузки. Поэтому на динамические режимы электроприводов таких механизмов оказывают существенное влияние следующие особенности зубчатых передач:

1. Наличие зазоров в зубчатом зацеплении. Приведенный к валу двигателя суммарный зазор передач увеличивается с ростом передаточного числа. При изношенном зубчатом венце механизмов поворота экскаваторов-драглайнов зазор может достигать 1–1,5 оборота вала двигателя.

2. Неравномерность хода, создаваемая зубчатым зацеплением. Она вызывается условиями работы зацепления и неточностью его изготовления и проявляется наиболее ощутимо в механизмах поворота экскаваторов и поворотных кранов с крупномодульным зубчатым венцовым зацеплением, схема которых показана на рис. 2-7, б.

Электропривод рассматриваемых механизмов представляет собой сложную электромеханическую систему, динамика которой существенно зависит от имеющихся в механизме упругих механических связей. В качестве примера на рис. 2-14, а приведена расчетная схема механической части электропривода поворота, учитывающая важнейшие упругие связи. Момент инерции J_1 включает в себя моменты инерции двигателя, тормозного шкива и редуктора, которые принимаются жестко связанными. Передача момента от двигателя к поворотной платформе, представленной на схеме моментом инерции J'_2 , происходит через приведенный зазор передач $\Delta\varphi$, и упругий элемент, обладающий жесткостью c_{12} . Эквивалентная жесткость передач c_{12} обычно определяется жесткостью выходного удлиненного вала редуктора, на котором размещается ведущая шестерня, обогатая зубчатый венец. Поворотная платформа J'_2 связана со стрелой J_3 упругим элементом с жесткостью c_{23} . Наконец, жесткость c_{34} характеризует связь подвешенного груза J_4 со стрелой, рассмотренную в предыдущем параграфе.

Для рассмотрения ряда физических процессов схема может быть существенно упрощена. Жесткости отдельных упругих связей и моменты инерции различны, поэтому влияние их на тот или иной процесс неодинаково. В § 2-4, рассматривая раскачивание груза, без большой погрешности можно было считать все остальные связи, кроме c_{34} , абсолютно жесткими, так как c_{34} много меньше других жесткостей. В данном случае при рассмотрении динамических процессов в передачах определяющей является жесткость передач c_{12} . Остальные связи можно либо полагать бесконечно жесткими, либо исключать из рассмотрения, на основе сопоставления их с основной. Очевидно, например, что $c_{34} \ll c_{12}$ и оказать принципиального влияния на процессы в редукторе не может.

Таким образом, при рассмотрении динамических процессов в передачах механическая часть электроприводов инерционных установок может быть с достаточным приближением представлена упрощенной расчетной механической схемой, приведенной на рис. 2-14, б, где $J_2 = J_2' + J_3 + J_4$. Рассмотрим с помощью рис. 2-14, б, какие нагрузки возникают в передачах при выборе зазоров.

В период выбора зазоров в передачах механическая связь между моментами инерции J_1 и J_2 отсутствует и под действием момента двигателя M происходит интенсивный разгон масс с моментом инерции

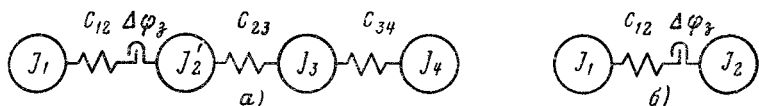


Рис. 2-14. Расчетные механические схемы электроприводов механизмов поворота.

J_1 , жестко связанных с валом двигателя. Если при этом принять $M = \text{const}$ и пренебречь механическими потерями, движение вала двигателя будет равноускоренным:

$$\omega_1 = \frac{M}{J_1} t = \varepsilon_{\text{max}} t. \quad (2-35)$$

За время выбора зазора t_1 двигатель успевает разогнаться до некоторой скорости $\omega_{1\text{нач}}$, которая при равномерно ускоренном движении определяется соотношением

$$\omega_{\text{max}} = \sqrt{2\varepsilon_{\text{max}} \Delta\varphi_3}. \quad (2-36)$$

Так как основные массы механизма с моментом инерции J_2 при этом неподвижны, процесс выбора зазора оканчивается упругим ударом, при котором запасенная во вращающихся со скоростью $\omega_{\text{нач}}$ массах с моментом инерции J_1 кинетическая энергия частично рассеивается в виде теплоты, а в основной части переходит в энергию упругих деформаций, вызывая дополнительные динамические нагрузки передач. Если начало отсчета времени t совместить с моментом окончания выбора зазоров и не учитывать факторов, вызывающих затухание колебаний, движение системы после выбора зазора может быть представлено системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} M - M_{12} &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_{c1} &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (2-37)$$

Решая (2-37) относительно M_{12} и учитывая, что $M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2)$, получаем следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{1}{\Omega_1^2} \frac{d^2 M_{12}}{dt^2} + M_{12} = J_2 \varepsilon_{cp} + M_{ct}, \quad (2-38)$$

где $\varepsilon_{cp} = (M - M_{cr}) / (J_1 + J_2)$ — среднее ускорение после выбора зазоров;

$\Omega_{12} = \sqrt{c_{12}(J_1 + J_2) / J_1 J_2}$ — собственная частота колебаний упругой двухмассовой механической системы.

Решение уравнения (2-38) при начальных условиях $t = 0$, $(M_{12})_0 = 0$, $(dM_{12}/dt)_0 = c_{12}\omega_{1нач}$ имеет вид:

$$M_{12} = J_2 \varepsilon_{cp} + M_{cr} + \frac{c_{12}\omega_{1нач}}{\Omega_{12}} \sin \Omega_{12}t - (J_2 \varepsilon_{cp} + M_{cr}) \cos \Omega_{12}t. \quad (2-39)$$

На рис. 2-15 штриховыми кривыми показан переходный процесс выбора зазоров без учета затухания, построенный на участке от $t = 0$ до $t = t_1$ в соответствии с (2-35), а на участке от $t = t_1$ до $t = t_2$ в соответствии с (2-39). С учетом демпфирующих сил процесс является затухающим (сплошные линии). Кривые свидетельствуют о том, что процесс выбора зазоров при слабом демпфировании может сопровождаться повторными замыканиями зазоров (области, где $M_{12} < 0$) и последующими повторными ударами при их выборе.

В соответствии с (2-39) динамический коэффициент, выражающий отношение максимальной нагрузки при выборе зазоров M_{12max} к установившейся (средней) M_{12cp} , определяется соотношением

$$k_{дин} = 1 + \sqrt{1 + \frac{c_{12}^2 \omega_{1нач}^2}{\Omega_{12}^2 (J_2 \varepsilon_{cp} + M_{cr})^2}}. \quad (2-40)$$

Соотношение (2-40) показывает, что без учета затухания при $\omega_{1нач} > 0$ всегда $k_{дин} > 2$, причем увеличивается с возрастанием начальной скорости и жесткости системы. С учетом (2-36) формулу (2-40) можно представить в виде

$$k_{дин} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2c_{12}^2 \varepsilon_{1нач} \Delta \varphi_3}{\Omega_{12}^2 (J_2 \varepsilon_{cp} + M_{cr})^2}}. \quad (2-41)$$

Таким образом, из (2-40) следует, что повышение плавности выбора зазоров и уменьшение динамических нагрузок в передачах при прочих равных условиях может быть достигнуто уменьшением начальной скорости вала двигателя $\omega_{1нач}$. В соответствии с (2-41) можно заключить, что при равномерно ускоренном движении в период выбора зазоров единственным средством уменьшения динамических нагрузок является ограничение ускорения на этом этапе $\varepsilon_{1нач}$. В простейшем случае, учитывая (2-35), можно ограничить ускорение $\varepsilon_{1нач}$ заданным значением путем соответствующего уменьшения момента двигателя в период выбора зазоров по сравнению с его значением, необходимым для получения требуемого среднего ускорения после выбора зазоров ε_{cp} .

С этой целью при использовании асинхронных двигателей с фазным ротором в электроприводах рассматриваемых установок обязательно предусматривают одну-две предварительные реостатные характеристики, обеспечивая возможность снижения пускового момен-

та до $(0,4-0,6) M_{\text{ном}}$ для выбора зазоров и слабину канатов. В тех редких случаях, когда для таких установок используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (например, механизмы передвижения некоторых козловых кранов), для ограничения момента двигателя вводят сопротивление в цепь обмотки статора.

В системах Г — Д и ТП — Д ограничение начального ускорения $\epsilon_{1\text{нач}}$ может быть достигнуто заданием соответствующего темпа нарастания э.д.с. преобразователя $e_{\text{пр}}$ во время выбора зазоров [4]:

$$\left(\frac{de_{\text{пр}}}{dt}\right)_{\text{доп}} = c \left(\frac{d\omega_1}{dt}\right)_{\text{доп}} = c\epsilon_{1\text{нач}}.$$

За счет индуктивности обмотки возбуждения генератора в системе Г — Д обеспечивается естественное ограничение de_r/dt , которое во многих практических случаях достаточно для получения требуемой плавности выбора зазоров. Исключением является электропривод поворота мощных экскаваторов типов ЭШ-10/70А, ЭШ-15/90А и др. для которых на время выбора зазоров необходимо подводить к обмотке возбуждения пониженное напряжение, дополнительно замедляя темп нарастания ЭДС. В системе ТП — Д, обладающей высоким быстродействием преобразователя, для выбора зазоров во всех случаях необходимо применять дополнительные средства, автоматически обеспечивающие в этот период заданный темп нарастания ЭДС преобразователя.

Следует иметь в виду, что при $\gamma = 10 \div 20$ обеспечить требуемое ограничение ускорения $\epsilon_{1\text{нач}}$ в замкнутой системе регулирования по схеме Г — Д или ТП — Д с помощью жесткой отрицательной обратной связи по току якоря не удастся. В период выбора зазоров даже при большом ускорении $\epsilon_{1\text{нач}}$ вследствие малости J_1 ток якоря невелик и обратная связь действует слабо. Для выбора зазоров на практике используют либо формирование закона изменения во времени задающего сигнала (программное управление), либо гибкую отрицательную связь по ЭДС, ограничивающую темп нарастания ЭДС в период выбора зазоров, которая после выбора зазоров автоматически отключается.

Примером устройства, действующего по второму принципу, может служить схема, приведенная на рис. 2-16. Здесь сигнал гибкой связи по ЭДС генератора создается обмоткой управления ОУТ, намотанной на главных полюсах:

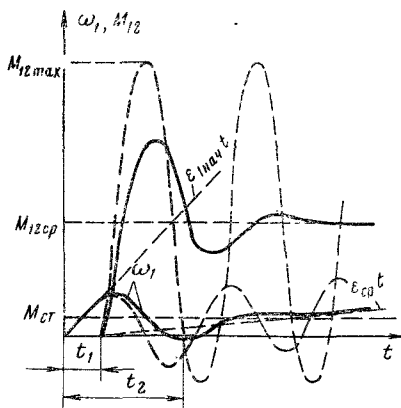


Рис. 2-15. Переходный процесс выбора зазоров.

$$e_{o,y,r} = -w_{o,y,r} \frac{d\Phi_r}{dt} = -\frac{w_{o,y,r}}{k_e} \frac{de_r}{dt}, \quad (2-42)$$

где $k_e = E_r/\Phi_r$ — коэффициент ЭДС генератора;

$w_{o,y,r}$ — общее число витков обмотки ОУГ на всех полюсах.

Сигнал, пропорциональный de_1/dt , подается на обмотку гибкой связи по ЭДС усилителя ОУУ через запирающий потенциал, пропорциональный току главной цепи. При выборе зазоров ток главной цепи мал, гибкая связь действует и ограничивает ускорение в требуемой степени. После выбора зазоров ток якоря возрастает за счет большой присоединяющейся массы и запирающий потенциал прекращает действие гибкой связи.

Наличие в кинематических цепях механизмов поворота крупнодульных венцовых зацеплений, точность изготовления которых ограничена, определяет повышенный уровень возмущений, обусловленных кинематическими погрешностями передач [4].

Свойственная зубчатой передаче неравномерность хода порождает периодические возмущения небольшой амплитуды, частота которых равна частоте перехода с зуба на зуб. Амплитуда возмущения зависит от момента инерции механизма J_2 . Если $J_2 \ll J_1$, амплитуды возмущений исчезающе малы и их влияние при работе электропривода не обнаруживается. Для инерционных механизмов с $J_2 \gg J_1$ амплитуды возмущений имеют более ощутимую величину и при неблагоприятных условиях могут оказывать значительное влияние на работу системы электропривода. В электроприводах поворота определяющее влияние оказывают возмущения, возникающие в зацеплении ведущая шестерня ВШ — неподвижный зубчатый венец ЗВ (см. рис. 2-7). Частота этих возмущений пропорциональна скорости двигателя

$$f_z = \frac{\omega_{пл} z_{з,в}}{2\pi} = \frac{\omega_1}{2\pi i_{общ}} z_{з,в}$$

где $\omega_{пл}$ — скорость платформы;

$z_{з,в}$ — число зубьев венца.

При пуске скорость двигателя меняется от 0 до $\omega_{1,уст}$, при этом частота возмущений соответственно увеличивается от $f_z = 0$ до $f_z = f_{z,уст}$. При торможении происходит уменьшение частоты возмущений от $f_{z,уст}$ до 0.

Рассмотренные выше физические явления, обусловленные наличием упругих связей в различных механизмах, достаточно наглядно показывают склонность механической части электропривода к колебаниям, которые возникают при различных возмущениях и без учета демпфирующих сил являются незатухающими. Известно, что наиболее неблагоприятным для подобных систем является периодическое возмущение с частотой, равной частоте свободных колебаний упругой механической системы Ω_{12} . При таком возмущении, имеющем даже небольшую амплитуду, в системе без затухания амплитуды колебаний неограниченно возрастают, а при наличии затухания возрастают до весьма больших значений, т. е. имеет место механический резонанс, представляющий большую опасность для конструкций.

Обычно $f_{z, \text{уст}} > \Omega_{12}/2\pi = f_{12}$, поэтому на участках переходных процессов, где f_z и f_{12} близки по значению, зубцовые возмущения вызывают колебания резонансного характера, вследствие которых возникают значительные дополнительные динамические нагрузки. Колебания скорости двигателя вызывают изменения его ЭДС и тока якорной цепи, и таким образом вся система электропривода вовлекается в общий бора зазоров. процесс электромеханических колебаний.

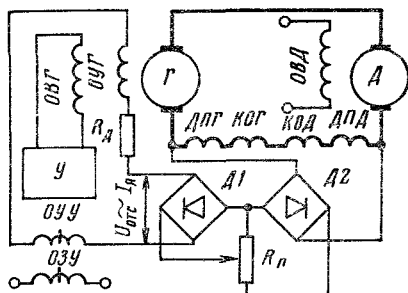


Рис. 2-16. Схема узла плавного вы-

Как было отмечено в § 2-4, линейная связь между скоростью и моментом двигателя аналогична вязкому трению, гасящему колебания. Индуктивность якорной цепи при больших γ уменьшает демпфирующее действие привода. Она ограничивает колебания тока и сдвигает их по фазе относительно колебаний скорости, отвод энергии колебаний в якорную цепь ухудшается. Отрицательная роль индуктивности якоря проявляется, очевидно, тем сильнее, чем выше резонансная частота Ω_{12} . Однако и с учетом индуктивности демпфирующее действие привода в однодвигательном приводе остается значительным. Дополнительные динамические нагрузки, возникающие за счет колебаний в зоне резонанса, не превосходят 30–40% среднего пускового значения.

Более неблагоприятные условия имеют место при многодвигательном приводе. Увеличение числа приводных двигателей является важнейшей тенденцией в развитии электроприводов инерционных механизмов. Широко применяется многодвигательный электропривод механизмов передвижения тяжелых кранов, увеличивается количество приводных двигателей механизмов поворота. В настоящее время большинство экскаваторов средней и большой мощности имеет двухдвигательный привод поворота, экскаваторы типов ЭШ-15/90А и ЭВГ-35/65М — четырехдвигательный, а экскаватор типа ЭШ-100/100 — восьмидвигательный привод поворота. Увеличение числа двигателей позволяет уменьшить нагрузки на зубчатый венец, равномернее распределить их вдоль его окружности.

Для улучшения распределения нагрузок между двигателями, связанными венцовым зацеплением, двигатели в системе Г — Д стремятся соединять последовательно. Такое соединение обеспечивает равномерное распределение нагрузки в установившемся режиме, но одновременно ухудшает демпфирование колебаний [4]. При последовательном соединении, например, двух двигателей для якорной цепи можно записать следующее уравнение:

$$e_{\text{пр}} = e_{d1} + e_{d2} + i_{\text{я}} R_{\Sigma} = c(\omega_{11} + \omega_{12}) + i_{\text{я}} R_{\Sigma}, \quad (2-43)$$

где ω_{11} и ω_{12} — скорости соответственно первого и второго двигателей.

Если возмущения, обусловленные неравномерностью хода каждой из двух ведущих шестерен, сдвинуты по фазе, возможно возникновение противофазных колебаний скорости двигателей. Как следует из (2-43), при этом в сумме ($\omega_{11} + \omega_{12}$) колебания проявляться не будут и демпфирующее действие привода может почти полностью отсутствовать. Возникающие при этом в переходных процессах динамические нагрузки за счет колебаний в области резонанса могут превосходить средние более чем в 2 раза и сопровождаться многократным зазорообразованием. Аналогичные условия имеют место и при последовательном соединении большого числа двигателей.

Статические нагрузки таких механизмов обычно значительно меньше динамических. Поэтому, как показано в [4], параллельное соединение двигателей в многодвигательном приводе механизмов с большими массами более предпочтительно. При этом демпфирующая способность привода максимальна, так как даже при возникновении колебаний в противофазе параллельное соединение якорей создает замкнутый контур для протекания уравнивающих токов. Энергия колебаний поглощается в виде теплоты в сопротивлениях этого демпфирующего контура.

2-6. ОГРАНИЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕГРУЗОК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТИПОВЫХ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Механические перегрузки являются важной особенностью рабочих режимов для большинства общепромышленных механизмов циклического действия. Для механизмов передвижения на рельсовом ходу они обусловлены либо перекасами при большом пролете крана, либо ветровой нагрузкой, если сооружение работает под открытым небом. Перегрузки крюковых подъемных лебедок могут возникать, например, при подхвате примерзшего или заклиненного груза. Наиболее тяжелые и частые механические перегрузки возникают у тех механизмов, для которых при нормальном течении технологического процесса возможна работа на упор — механическое стопорение рабочего органа.

Систематическими механическими перегрузками и механическими стопорениями сопровождается работа практически всех механизмов, участвующих в процессе черпания грунта или перемещения материала, — напорных, подъемных и тяговых лебедок экскаваторов и грейферных кранов. При работе в мягких грунтах перегрузки могут достигать опасных значений, но нарастают во времени постепенно. Такие режимы называют мягкими стопорениями. При черпании скальной породы экскаватором или смерзшегося транспортируемого грун-

та грейферным краном возможны внезапные заклинивания рабочего органа — так называемые резкие стопорения.

Во всех случаях, когда возникающие по любой причине механические перегрузки превосходят перегрузочную способность привода и допустимую нагрузку механизма, должно обеспечиваться автоматическое ограничение момента, развиваемого двигателем, допустимым значением. Допустимый момент двигателя определяется максимально допустимой нагрузкой механизма по условиям его механической прочности. С другой стороны, его кратность по отношению к номинальному моменту не должна превосходить перегрузочной способности двигателя. Выбранное из этих двух условий значение момента в дальнейшем будем называть допустимым стопорным моментом и обозначать $M_{\text{стоп}}$.

Требования к системе ограничения момента для разных механизмов различны. Если опасные перегрузки — несистематическое, редкое явление, система может действовать как защитное устройство, вызывающее отключение привода и перерыв в работе механизма. Примером электрического устройства может служить максимальная защита двигателя, отключающая его от сети с помощью контактора или автомата при токе, превышающим номинальный в 2—2,5 раза. Примером механического защитного устройства может служить введение в кинематическую цепь механизма недостаточно прочного звена, например ослабленной шпонки. При опасной перегрузке шпонка срезается, разобщая механизм и двигатель.

Однако подобные устройства неприменимы для механизмов, работа которых систематически сопровождается перегрузками и стопорениями. В таких случаях должно предусматриваться автоматическое ограничение момента, не вызывающее перерывов в работе механизма, которые в недопустимой степени снизили бы его производительность. Непрерывное ограничение момента может быть осуществлено электрическим или механическим путем.

Электрическое непрерывное ограничение момента достигается использованием электропривода с экскаваторной механической характеристикой. Оно находит самое широкое применение не только для ограничения механических перегрузок, но и для формирования переходных процессов пуска, реверса и торможения. Качество ограничения момента обычно характеризуется заполнением экскаваторной характеристики, которое тем больше, чем жестче ее рабочий участок и чем круче падающий. Идеальная экскаваторная характеристика показана на рис. 2-17 (кривая 1). Там же представлены реальные экскаваторные ха-

характеристики с разным заполнением (кривые 2, 3). Рассматривая этот рисунок, можно заключить, что при достаточно высокой жесткости рабочего участка характеристик их заполнение может оцениваться с помощью так называемого коэффициента отсечки:

$$k_{отс} = M_{отс} / M_{стоп}$$

Для выяснения основных физических особенностей режимов резких стопорений проанализируем переходный процесс электропривода подъема экскаватора-лопаты вызванный внезапной

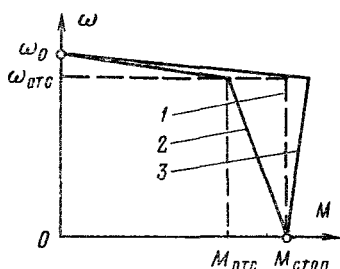


Рис. 2-17. Экскаваторные механические характеристики.

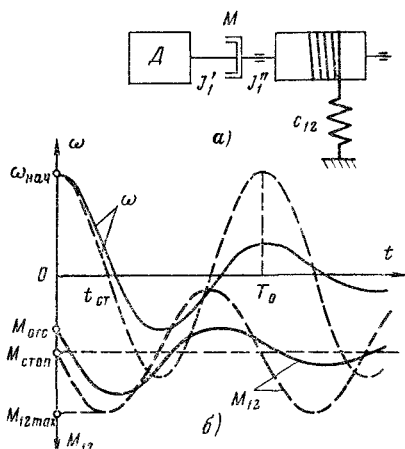


Рис. 2-18. К анализу процессов стопорения.

остановкой ковша при встрече с невзорванной скалой. Примем, что момент двигателя M в переходном процессе изменяется в соответствии с механической характеристикой 2 на рис. 2-17 и что единственным упругим элементом схемы является подъемный канат. При этом в соответствии с расчетной схемой на рис. 2-18, а, пренебрегая имеющимися в механизме силами трения, можно записать:

$$M - M_{12} = J_1 \frac{d\omega}{dt}, \quad (2-44)$$

где $M_{12} = c_{12}\varphi$ — приведенный к валу двигателя момент, создаваемый на барабане натяжением каната;

c_{12} — приведенная к валу двигателя жесткость каната;

φ — приведенное к валу двигателя удлинение каната;

$J_1 = J'_1 + J''_1$ — приведенный к валу двигателя момент инерции электропривода.

Уравнение падающего участка экскаваторной характеристики

$$M = M_{\text{стоп}} - \frac{M_{\text{стоп}} - M_{\text{отс}}}{\omega_{\text{отс}}} \omega = M_{\text{стоп}} - \beta \omega, \quad (2-45)$$

где $\beta = \frac{M_{\text{стоп}}}{\omega_{\text{отс}}} (1 - k_{\text{отс}})$ — модуль жесткости падающего участка механической характеристики.

Подставив выражения для M_{12} и M в (2-44), продифференцировав его, получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{\beta}{J_1} \frac{d\omega}{dt} + \frac{c_{12}}{J_1} \omega = 0. \quad (2-46)$$

Корни характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -\frac{\beta}{2J_1} \pm \sqrt{\frac{\beta^2}{4J_1^2} - \frac{c_{12}}{J_1}} = -\alpha \pm j\Omega, \quad (2-47)$$

так как обычно

$$\beta^2/4J_1^2 < c_{12}/J_1.$$

Решение уравнения относительно скорости двигателя необходимо искать в виде

$$\omega = e^{-\alpha t} (A \sin \Omega t + B \cos \Omega t).$$

Принимаем, что в момент начала стопорения инерционные массы привода движутся со скоростью $\omega_{\text{нач}} = \omega_{\text{отс}}$ и $M = M_{12} = M_{\text{отс}}$. Подставляя начальные условия: $(\omega)_0 = \omega_{\text{нач}}$ и $(d\omega/dt)_0 = 0$ при $t = 0$, определяем постоянные интегрирования:

$$A = \alpha \omega_{\text{нач}} / \Omega; \quad B = \omega_{\text{нач}}.$$

Решение уравнения после подстановки постоянных интегрирования и преобразований приобретает вид:

$$\omega = \omega_{\text{нач}} \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{\Omega}\right)^2} e^{-\alpha t} \sin(\Omega t + \psi_1), \quad (2-48)$$

где $\psi_1 = \arctg \frac{\Omega}{\alpha}$.

Решение исходного дифференциального уравнения относительно момента M_{12} , пропорционального натяжению каната и характеризующего нагрузку механической части привода, следует искать в виде

$$M_{12} = M_{\text{стоп}} + e^{-\alpha t} (C \sin \Omega t + D \cos \Omega t). \quad (2-49)$$

С помощью начальных условий $(M_{12})_0 = M_{отс}$, $(dM_{12}/dt)_0 = c_{12}\omega_{нач}$ определяются постоянные C и D :

$$C = \frac{c_{12}\omega_{нач} - \alpha(M_{стоп} - M_{отс})}{\Omega}; \quad D = -(M_{стоп} - M_{отс}).$$

После преобразований, с учетом соотношения

$$M_{стоп} - M_{отс} = \beta\omega_{отс} = \beta\omega_{нач},$$

решение уравнения относительно M_{12} имеет вид:

$$M_{12} = M_{стоп} + \omega_{нач}\beta \sqrt{1 + \left(\frac{c_{12} - \alpha\beta}{\beta\Omega}\right)^2} e^{-\alpha t} \sin(\Omega t - \psi_2),$$

где $\psi_2 = \arctg \frac{\beta\Omega}{c_{12} - \alpha\beta}$.

Полученным аналитическим зависимостям (2-48) и (2-49) соответствуют построенные на рис. 2-18, б сплошными линиями кривые ω , $M_{12} = f(t)$. Там же штриховыми линиями показан характер процесса стопорения при $\beta = 0$, т. е. при идеальной экскаваторной характеристике l (см. рис. 2-17). В этом случае процесс стопорения протекает при $M = M_{стоп} = \text{const}$ и соотношения (2-47)–(2-49) упрощаются:

$$\omega = \omega_{нач} \cos \Omega_0 t; \quad (2-50)$$

$$M_{12} = M_{стоп} + \frac{c_{12}\omega_{нач}}{\Omega_0} \sin \Omega_0 t, \quad (2-51)$$

где $\Omega_0 = \sqrt{c_{12}/J_1}$ — частота свободных колебаний упругой механической системы.

Рассматривая приведенные на рис. 2-18, б кривые, можно видеть, что пропорциональный усилию в канате момент M_{12} возрастает по мере снижения скорости, так как запасенная в останавливающихся инерционных массах кинетическая энергия, освобождаясь, переходит в потенциальную энергию упругого растяжения каната. Наличие избыточного запаса потенциальной энергии при $\omega = 0$ является причиной, вызывающей разгон барабана и связанных с ним масс в противоположную сторону. Поэтому процесс стопорения имеет колебательный характер, причем при идеальной экскаваторной характеристике теоретически в соответствии с (2-50) и (2-51) колебания являются незатухающими. Практически вследствие неучтенных потерь на трение энергия упругих колебаний и в этом случае рассеивается в виде теплоты в трущихся элементах, но медленнее, чем при $\beta \neq 0$.

Полученные зависимости свидетельствуют о том, что при ограниченном экскаваторной характеристикой моменте двига-

теля $M \leq M_{\text{стоп}}$ максимальные нагрузки элементов привода в процессе стопорения увеличиваются за счет динамической нагрузки и при неблагоприятных условиях могут достигать опасных значений. Без учета затухания максимальное значение момента M_{12} определяется из (2-51):

$$M_{12 \max} = M_{\text{стоп}} + \omega_{\text{нач}} \sqrt{J_1 c_{12}}. \quad (2-52)$$

Отношение максимальной нагрузки к установившейся определяет динамический коэффициент:

$$k_{\text{дин}} = \frac{M_{12 \max}}{M_{\text{стоп}}} = 1 + \omega_{\text{нач}} \frac{\sqrt{J_1 c_{12}}}{M_{\text{стоп}}}. \quad (2-53)$$

Динамический коэффициент характеризует перегрузки механической части электропривода при резких стопорениях в сравнении с установившимся режимом стопорения. Из (2-53) следует, что перегрузки тем больше, чем больше начальная скорость $\omega_{\text{нач}}$, момент инерции J_1 и жесткость рабочего оборудования c_{12} .

Сравнивая (2-49) и (2-51), а также соответствующие характеристики на рис. 2-17, можно убедиться, что при уменьшении коэффициента отсечки (увеличение β) затухание колебаний увеличивается. Действительно, как уже отмечалось, линейная связь момента двигателя со скоростью аналогична вязкому трению $M_{\text{тр}} = \beta \omega$ и оказывает демпфирующее действие, способствуя быстрому затуханию колебаний. Увеличение затухания влечет за собой некоторое уменьшение динамического коэффициента.

Поэтому для подъемных лебедок экскаваторов-лопат и грейферных кранов желательна характеристика с коэффициентом отсечки $k_{\text{отс}} = 0,7 \div 0,8$ (характеристика 2 на рис. 2-17). Такая форма экскаваторной характеристики одновременно уменьшает частоту стопорений, так как обеспечивает заблаговременное снижение скорости при механической перегрузке еще до достижения стопорной нагрузки. При этом по снижению скорости машинист оценивает нагрузку двигателя и своевременно предпринимает действия, направленные на уменьшение перегрузки, например уменьшение напорного усилия экскаватор-лопаты при перегрузке электропривода подъема.

Чем тяжелее условия стопорения, чем больше жесткость механического оборудования c_{12} , тем желателен меньший коэффициент отсечки. В этом отношении наиболее характерен механизм напора экскаватора-лопаты с реечной передачей, которая дает весьма жесткое сочленение рукояти с приводом. Из-за большой жесткости c_{12} в данном случае процессы резких стопорений носят характер тяжелых ударов с опасными значениями

ми динамического коэффициента. Для этого механизма выбирают $k_{отс} = 0,6 \div 0,7$ и для защиты от поломок в его кинематическую цепь вводят муфту предельного момента, настроенную на срабатывание при $M = (1,2 \div 1,4) M_{стоп}$.

Если экскаваторная характеристика предусматривается только для ограничения момента в переходных процессах, то для получения их равномерно ускоренного протекания желательно возможно более высокое заполнение. Оптимальным является $k_{отс} = 1$, соответствующий характеристике 1 на рис. 2-17. Для электроприводов поворота экскаваторов и других инерционных механизмов желательно использовать характеристику с еще большим заполнением — кривая 3 на рис. 2-17. При этом уменьшается разница между динамическими моментами при торможении реверсом и пуске, обусловленная реактивным характером момента нагрузки, чем достигается лучшее использование допустимого ускорения при пуске.

Простейшим примером экскаваторной характеристики с $k_{отс} < 1$ может служить характеристика асинхронного двигателя, если путем введения в его роторную цепь добавочного сопротивления получить $s_{кр} = 1$ и если $M_{кр} = M_{стоп}$. Однако, обеспечивая ограничение момента, эта характеристика мало ограничивает ток двигателя, кратность которого $I_1/I_{ном}$ при $s_{кр} = 1$ больше, чем кратность момента $M_{кр}/M_{ном}$, в 1,5–2 раза. Поэтому использование асинхронного двигателя в установках с частыми стопорениями нежелательно. Большие потери при всех переходных процессах и при механических перегрузках вызывают превышение температуры двигателя и повышают удельный расход энергии.

Преимущественное применение в указанных установках получила система с питанием двигателя постоянного тока от индивидуального управляемого преобразователя — генератора (Г–Д) или тиристорного преобразователя (ТП–Д). Для этих систем ток якоря определяется соотношением

$$i_a = (e_{пр} - e_{дв})/R_{я, \Sigma} = (e_{пр} - c\omega)/R_{я, \Sigma},$$

где $e_{пр}$, $e_{дв}$ — текущие значения ЭДС преобразователя и двигателя;

$R_{я, \Sigma}$ — суммарное сопротивление якорной цепи.

При стопорении скорость двигателя и его ЭДС снижаются по закону, показанному на рис. 2-18, б сплошной линией. Для того чтобы ток якоря не превосходил стопорного тока, необходимо, чтобы разность $e_{пр} - e_{дв}$ в любой момент времени не

превосходила падения напряжения, соответствующего стопорному току:

$$e_{\text{пр}} - e_{\text{дв}} \leq I_{\text{стоп}} R_{\text{я}} \Sigma. \quad (2-54)$$

Таким образом, для ограничения момента необходимо, чтобы ЭДС преобразователя $e_{\text{пр}}$ без запаздывания снижалась по тому же закону, что и ЭДС двигателя и его скорость. Тиристорный преобразователь имеет малую инерционность, поэтому условие (2-54) при стопорении обеспечивается без затруднений. Генератор постоянного тока обладает значительной электромагнитной инерцией. Гашение его поля при резких стопорениях требует больших форсировок и обычно сопровождается никами тока якоря и момента, превышающими стопорное значение. Поэтому в системе Г—Д необходимо выбирать запас по напряжению возбуждения, характеризуемый коэффициентом $\alpha = U_{\text{в, max}}/U_{\text{в, уст}}$, таким, чтобы обеспечивалось гашение поля генератора за время, равное времени снижения скорости двигателя при стопорении до нуля. При известных параметрах это время можно определить, не учитывая в первом приближении затухания:

$$t_{\text{стоп}} \approx \frac{T_0}{4} = \frac{\pi}{2\Omega_0} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{J_1}{c_{12}}}. \quad (2-55)$$

Механическое непрерывное ограничение момента обеспечивается путем использования муфт предельного момента или других устройств с ограниченным предельным передаваемым моментом. При перегрузке механизма, превышающей $M_{\text{стоп}}$ муфта M (см. рис. 2-18, а) проскальзывает, разобщая жесткую связь двигателя с рабочим оборудованием механизма и развивая при этом постоянный момент $M = M_{\text{стоп}}$ на валу двигателя.

Применение муфты предельного момента позволяет во много раз снизить момент инерции стопорящихся элементов, так как для подъемных, напорных и тяговых лебедок основную долю в суммарном приведенном к валу двигателя моменте инерции привода составляет момент инерции двигателя.

Соотношения (2-50)—(2-53), полученные для случая стопорения с $M = M_{\text{стоп}} = \text{const}$, справедливы и в данном случае, если вместо J_1 в них подставлять момент инерции J_1'' той части привода, которая при стопорении останавливается. Так как $J_1'' = (0,1 \div 0,2) J_1$, в соответствии с (2-53) динамический коэффициент $k_{\text{дин}}$ при использовании муфты предельного момента невелик.

Недостатком муфт предельного момента являются их большие габариты и стоимость, быстрый износ при интенсивной работе. Поэтому в качестве основного средства ограничения момента механические устройства используются при небольшой мощности, в частности для экскаваторов и кранов с групповым дизельным, электрическим или дизельэлектрическим приводом. При этом они одновременно служат и для раздельного управления механизмами. На экскаваторах средней и большой производительности, как правило, этот способ не применяется. Как исключение, устанавливаются защитные муфты предельного момента на реечных механизмах напора, у которых в связи с большой жесткостью механизма c_{12} (канат отсутствует) электрическое ограничение момента не обеспечивает удовлетворительного снижения динамического коэффициента при резких стопорениях.

2.7. ОСОБЕННОСТИ СТАТИКИ И ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

Как выше было показано, различные грузоподъемные, землеройные, загрузочные и другие машины, предназначенные для выполнения операций, требующих пространственного перемещения рабочего органа, являются характерными представителями обширного класса машин типа командных промышленных манипуляторов. Поэтому рассмотрение особенностей статики и динамики электроприводов машин с несколькими степенями свободы целесообразно начать с простейших и наглядных примеров экскаватора и крана.

Рассмотрим рабочие нагрузки механизмов подъема и тяги экскаватора-драглайна, возникающие в режимах свободного подъема ковша по различным траекториям. С этой целью на рис. 2-19 показан ряд положений центра тяжести подвешенного на канатах ковша и осуществлено графическое разложение силы тяжести G_k на составляющие ее силы натяжения подъемного F_n и тягового F_t канатов, направления которых в каждой точке известны.

Точка I соответствует моменту отрыва груженого ковша после черпания с глубины забоя. При этом вес ковша примерно поровну распределяется между подъемным и тяговым канатами; соответственно натяжения F_n и F_t составляют примерно половину G_k . Точка II также соответствует отрыву груженого ковша после черпания, но в верхней части забоя, вблизи нижнего блока наводки тягового каната. Здесь за счет увеличения

растяжки ковша натяжения F_{Π} и F_T значительно больше, чем в точке I , и могут по абсолютному значению превышать вес ковша. В точке III определены натяжения канатов, которые имеют место при подъеме груженого ковша по вертикали или при спуске порожнего ковша в забой. В том и другом случае сила F_{Π} примерно равна весу ковша (соответственно груженого

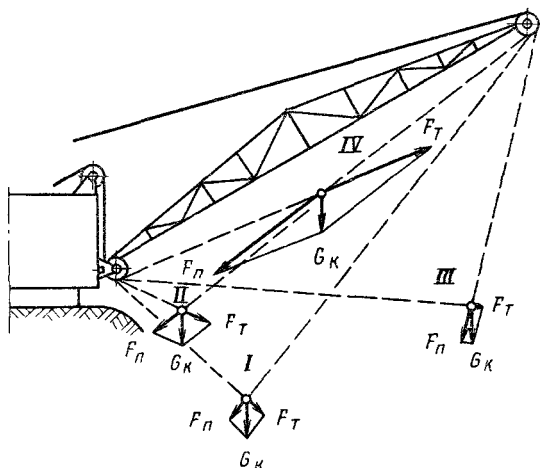


Рис. 2-19. Зависимость статических нагрузок подъемного и тягового канатов экскаватора-драглайна от положения ковша.

или порожнего), а натяжение тягового каната либо имеет небольшое значение, необходимое для удержания ковша от опрокидывания и разгрузки, либо при спуске ковша может быть близко к нулю. Точка IV соответствует аварийной растяжке ковша, при которой создается опасность удара ковшом по стреле, так как небольшое увеличение растяжки вызывает большие ускорения ковша в направлении стрелы.

Если в точке I остановить привод тяги и осуществлять подъем ковша за счет подъемной лебедки, ковш будет приближаться к стреле, а нагрузка тягового каната возрастать. Аналогично, если в точке III остановить привод подъема и подтягивать ковш тягой, ковш будет перемещаться по дуге окружности к стреле и с ростом растяжки нагрузка подъемного каната станет возрастать вначале медленно, а затем все быстрее. Перемещение ковша по требуемой траектории требует согласованной работы приводов подъема и тяги, причем очевидно взаимное влияние этих приводов на возникающие при работе их статиче-

ские нагрузки. Аналогичным путем можно убедиться, что такое же взаимное влияние характерно и для электроприводов подъема и напора экскаватора-лопаты.

Процесс перемещения ковша на выгрузку по требуемой пространственной траектории обеспечивается совместной работой электроприводов подъема, тяги и поворота платформы экскаватора. Если рассмотреть условия протекания переходных процессов электропривода поворота при положениях ковша I—IV (рис. 2-19), можно установить, что суммарный приведенный момент инерции электропривода поворота J_{Σ} при работе электроприводов подъема и тяги непрерывно изменяется, так как приведенный момент инерции груженого ковша на полном вылете составляет значительную долю J_{Σ} , а при перемещении к точке II быстро снижается пропорционально квадрату расстояния от оси вращения платформы. С другой стороны, при вращении платформы возникает центробежная сила инерции ковша, которая увеличивает натяжение тягового каната. Таким образом, очевидно взаимное влияние всех электроприводов драглайна как в статических, так и в динамических режимах работы.

Установленная особенность определяет трудности анализа динамических процессов электроприводов машин-манипуляторов. В теории электропривода [4] для описания динамики механической части электроприводов в общем случае используются уравнения Лагранжа. Воспользуемся этим математическим аппаратом для выявления основных особенностей электроприводов изменения вылета стрелы и поворота платформы portalного крана, рассматриваемых как объект автоматического управления. Лебедка изменения вылета осуществляет поворот стрелы в вертикальной плоскости относительно опорного шарнира, который можно считать расположенным на оси вращения платформы. При этом изменение вылета стрелы 3 (см. рис. 1-2, б) сопровождается соответствующим изменением вылета противовеса 5, связанного с ней тягой 6. Этим обеспечивается уравновешивание веса стрелы относительно оси вращения платформы. Суммарный момент инерции электропривода поворота за счет введения противовеса увеличивается незначительно, так как приведенный момент инерции номинального груза, пропорциональный квадрату его расстояния от оси вращения, намного больше приведенного момента инерции противовеса, имеющего значительно меньший вылет. Учитывая эти соображения, в первом приближении для анализа динамики данных взаимодействующих электроприводов можно использовать пространственную расчетную электромеханическую схему, показанную на рис. 2-20.

На рис. 2-20 приняты обозначения: $M_{\text{п}}$, $M_{\text{в}}$ — электромагнитные моменты двигателей подъема (изменения вылета) стрелы ДП и вращения платформы ДВ; $\varphi_{1\text{п}}$, $\varphi_{1\text{в}}$ — углы поворота двигателей ДП и ДВ; $J_{1\text{п}}$, $J_{1\text{в}}$ — моменты инерции двигателей ДП и ДВ и жестко связанных с ними элементов приводов; $c_{12\text{п}}$, $c_{12\text{в}}$ — эквивалентная жесткость передач приводов подъема стрелы и вращения платформы; $\Delta\varphi_{3,\text{п}}$, $\Delta\varphi_{3,\text{в}}$ — кинематические зазоры тех же передач; $\varphi_{2\text{п}}$, $\varphi_{2\text{в}}$ — углы поворота стрелы и поворота платформы; $J_{2\text{п}}$ и $J_{2\text{в}}$ — моменты инерции барабана лебедки изменения вылета (связь барабана со стрелой принята жесткой) и поворотной платформы (связь платформы со стрелой принята жесткой); $\Delta M_{1\text{п}}$, $\Delta M_{2\text{п}}$, $\Delta M_{1\text{в}}$, $\Delta M_{2\text{в}}$ — моменты потерь на трение, приложенные к соответствующим массам; $m_{\text{ст}}$, $m_{\text{пр}}$ — массы стрелы с грузом и противовеса, сосредоточенные в центрах тяжести с координатами соответственно $\varphi_{2\text{п}}$, $r_{\text{ст}}$ и $-\varphi_{2\text{п}}$, $r_{\text{пр}}$. Все параметры и координаты электроприводов приведены к их выходным валам.

В общем случае для i -й степени свободы уравнение Лагранжа имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad (2-56)$$

где $L = W_{\text{к}} - W_{\text{п}}$ — функция Лагранжа;

$W_{\text{к}}$, $W_{\text{п}}$ — суммарный запас соответственно кинетической и потенциальной энергии системы;

Q_i — обобщенные неконсервативные силы;

q_i , $\dot{q}_i$ — обобщенные координаты и скорости.

Примем в качестве обобщенных координат переменные $\varphi_{1\text{п}}$, $\varphi_{1\text{в}}$, $\varphi_{2\text{п}}$, $\varphi_{2\text{в}}$. При этом кинетическая и потенциальная энергии системы могут быть определены по формулам:

$$W_{\text{к}} = J_{1\text{в}} \frac{\omega_{1\text{в}}^2}{2} + J_{2\text{в}} \frac{\omega_{2\text{в}}^2}{2} +$$

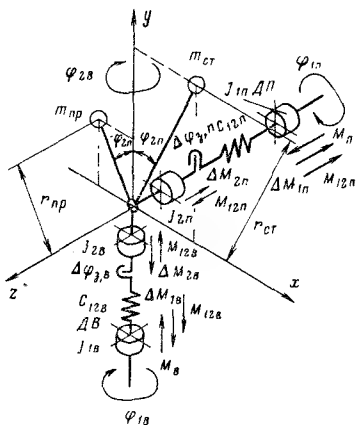


Рис. 2-20. Расчетная механическая схема электропривода изменения вылета и поворота портального крана.

$$+ \frac{(m_{\text{сг}} r_{\text{сг}}^2 + m_{\text{пр}} r_{\text{пр}}^2) \omega_{2\text{в}}^2 \sin^2 \varphi_{2\text{п}}}{2} +$$

$$+ J_{1\text{п}} \frac{\omega_{1\text{п}}^2}{2} + J_{2\text{п}} \frac{\omega_{2\text{п}}^2}{2} + \frac{(m_{\text{сг}} r_{\text{сг}}^2 + m_{\text{пр}} r_{\text{пр}}^2) \omega_{2\text{п}}^2}{2}; \quad (2-57)$$

$$W_{\text{п}} = \frac{c_{12\text{в}} (\varphi_{1\text{в}} - \varphi_{2\text{в}})^2}{2} + \frac{c_{12\text{п}} (\varphi_{1\text{п}} - \varphi_{2\text{п}})^2}{2} +$$

$$+ g (1 + \cos \varphi_{2\text{п}}) (m_{\text{сг}} r_{\text{сг}} - m_{\text{пр}} r_{\text{пр}}), \quad (2-58)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $\omega_{1\text{в}} = \dot{\varphi}_{1\text{в}}$; $\omega_{2\text{в}} = \dot{\varphi}_{2\text{в}}$; $\omega_{1\text{п}} = \dot{\varphi}_{1\text{п}}$; $\omega_{2\text{п}} = \dot{\varphi}_{2\text{п}}$.

Если подставить (2-57) и (2-58) в (2-56), произвести необходимые операции дифференцирования и преобразования, то с учетом показанных на рис. 2-20 обобщенных сил можно получить следующую систему уравнений движения:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{в}} - M_{12\text{в}} - \Delta M_{1\text{в}} &= J_{1\text{в}} \frac{d\omega_{1\text{в}}}{dt}; \\ M_{12\text{в}} - \Delta M_{2\text{в}} &= J_{2\text{в}} \frac{d\omega_{2\text{в}}}{dt} + (m_{\text{сг}} r_{\text{сг}}^2 + \\ &+ m_{\text{пр}} r_{\text{пр}}^2) \left(\sin^2 \varphi_{2\text{п}} \frac{d\omega_{2\text{в}}}{dt} + 2\omega_{2\text{п}} \omega_{2\text{в}} \sin \varphi_{2\text{п}} \right); \\ M_{\text{п}} - M_{12\text{п}} - \Delta M_{1\text{п}} &= J_{1\text{п}} \frac{d\omega_{1\text{п}}}{dt}; \\ M_{12\text{п}} - \Delta M_{2\text{п}} + (m_{\text{сг}} r_{\text{сг}} - m_{\text{пр}} r_{\text{пр}}) g \sin \varphi_{2\text{п}} + \\ &+ \omega_{2\text{в}}^2 (m_{\text{сг}} r_{\text{сг}}^2 + m_{\text{пр}} r_{\text{пр}}^2) \sin \varphi_{2\text{п}} \cos \varphi_{2\text{п}} = \\ &= J_{2\text{п}} \frac{d\omega_{2\text{п}}}{dt} + (m_{\text{сг}} r_{\text{сг}}^2 + m_{\text{пр}} r_{\text{пр}}^2) \frac{d\omega_{2\text{п}}}{dt}; \\ M_{12\text{в}} &= c_{12\text{в}} (\varphi_{1\text{в}} - \varphi_{2\text{в}}); \\ M_{12\text{п}} &= c_{12\text{п}} (\varphi_{1\text{п}} - \varphi_{2\text{п}}). \end{aligned} \right\} \quad (2-59)$$

Полученной системе уравнений (2-59) соответствует структурная схема механической части взаимодействующих электроприводов подъема стрелы и вращения платформы портального крана, показанная на рис. 2-21. Эта схема наглядно характеризует основные особенности приводов машин-манипуляторов как объектов автоматического регулирования. Взаимодействующие электроприводы механизмов таких машин представляют собой многосвязные нелинейные электромеханические системы, в которых изменения одной координаты оказывают влияние на статические и динамические нагрузки электропривода другой, причем в нелинейной зависимости.

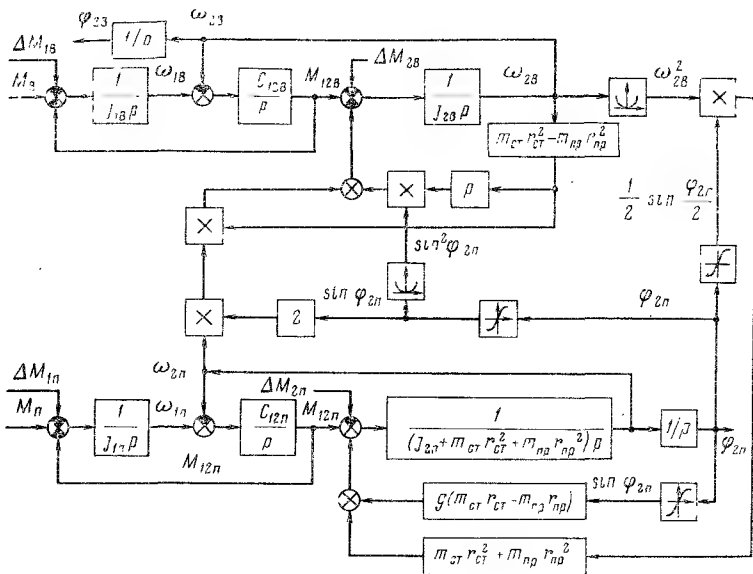


Рис. 2-21. Структурная схема механической части электроприводов изменения вылета и поворота portalного крана.

Задача исследования динамических процессов во взаимодействующих электроприводах существенно осложняется с ростом числа степеней свободы рабочего органа машины. Наибольшие трудности вызывает математическое описание и анализ динамики многозвенных механизмов манипуляторов промышленных роботов. В качестве примера составим уравнения движения руки манипулятора (рис. 2-22) в плоскости x, y . Примем, что вращение звеньев руки относительно каждого из шарниров осуществляется встроенным в шарниры электроприводами, причем центры тяжести первых двух звеньев совпадают с осями второго и третьего шарниров. Для получения математического описания динамики данной системы с помощью (2-56) необходимо выразить координаты центров тяжести масс в осях x, y (соответственно x_1, y_1, x_2, y_2 и x_3, y_3) через обобщенные координаты системы $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ [22]:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= r_1 \sin \varphi_1; y_1 = r_1 \cos \varphi_1; x_2 = r_1 \sin \varphi_1 + r_2 \sin (\varphi_1 + \varphi_2); \\ y_2 &= r_1 \cos \varphi_1 + r_2 \cos (\varphi_1 + \varphi_2); \\ x_3 &= r_1 \sin \varphi_1 + r_2 \sin (\varphi_1 + \varphi_2) + r_3 \sin (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3); \\ y_3 &= r_1 \cos \varphi_1 + r_2 \cos (\varphi_1 + \varphi_2) + r_3 \cos (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3). \end{aligned} \right\} \quad (2-60)$$

Кинетическая энергия системы определяется соотношением

$$W_k = m_1 \frac{\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2}{2} + m_2 \frac{\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2}{2} + m_3 \frac{\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2}{2}. \quad (2-61)$$

Ограничимся рассмотрением динамики системы в области малых отклонений от положения равновесия. При этом

$$\begin{aligned} \cos \varphi_2 &\approx \cos \varphi_3 \approx \cos(\varphi_1 + \varphi_3) \approx 1; \\ \cos \varphi_1 &\approx 1 - \varphi_1^2/2; \quad \cos(\varphi_1 + \varphi_2) = 1 - (\varphi_1 + \varphi_2)^2/2; \\ \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) &\approx 1 - (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)^2/2. \end{aligned}$$

Подставив (2-60) в (2-61), с учетом указанных приближенных соотношений получим:

$$\begin{aligned} W_k = & \frac{\omega_1^2}{2} (m_1 + m_2 + m_3) r_1^2 + \frac{(\omega_1 + \omega_2)^2}{2} (m_2 + m_3) r_2^2 + \\ & + \frac{(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)^2}{2} m_3 r_3^2 + \omega_1 (\omega_1 + \omega_2) (m_2 + m_3) r_1 r_2 + \\ & + \omega_1 (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) m_3 r_1 r_3 + (\omega_1 + \omega_2) (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) m_3 r_2 r_3, \end{aligned} \quad (2-62)$$

где $\omega_1 = \dot{\varphi}_1$; $\omega_2 = \dot{\varphi}_2$; $\omega_3 = \dot{\varphi}_3$.

Потенциальная энергия системы определяется соотношением

$$\begin{aligned} W_{\Pi} = & (m_1 + m_2 + m_3) g r_1 (1 - \cos \varphi_1) + (m_2 + m_1) \times \\ & \times g r_2 [1 - \cos(\varphi_1 + \varphi_2)] + m_3 g r_3 [1 - \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)]. \end{aligned} \quad (2-63)$$

С учетом указанных приближенных соотношений при малых отклонениях (2-63) примет вид:

$$\begin{aligned} W_{\Pi} = & (m_1 + m_2 + m_3) g r_1 \frac{\varphi_1^2}{2} + (m_2 + m_3) g r_2 \times \\ & \times \frac{(\varphi_1 + \varphi_2)^2}{2} + m_3 g r_3 \frac{(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)^2}{2}. \end{aligned} \quad (2-64)$$

Подставив (2-62) и (2-64) в (2-56) и выполнив необходимые преобразования, получим искомые уравнения движения системы:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + a_{12} \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} + a_{13} \frac{d^2 \varphi_3}{dt^2} + c_{11} \varphi_1 + c_{12} \varphi_2 + c_{13} \varphi_3 = \\ = M_1 - \Delta M_1; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} a_{21} \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + a_{22} \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} + a_{23} \frac{d^2 \varphi_3}{dt^2} + c_{21} \varphi_1 + c_{22} \varphi_2 + c_{23} \varphi_3 &= \\ &= M_2 - \Delta M_2; \\ a_{31} \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + a_{32} \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} + a_{33} \frac{d^2 \varphi_3}{dt^2} + c_{31} \varphi_1 + c_{32} \varphi_2 + c_{33} \varphi_3 &= \\ &= M_3 - \Delta M_3, \end{aligned} \right\} (2-65)$$

где M_i и ΔM_i — электромагнитные моменты двигателей и моменты потерь на трение;

$$a_{ik} = a_{ki}; \quad c_{ik} = c_{ki}; \quad i = 1, 2, 3 \dots; \quad k = 1, 2, 3 \dots$$

Выражения для определения коэффициентов [22]:

$$a_{11} = m_1 r_1^2 + m_2 (r_1 + r_2)^2 + m_3 (r_1 + r_2 + r_3)^2;$$

$$a_{22} = m_2 r_2^2 + m_3 (r_2 + r_3)^2; \quad a_{33} = m_3 r_3^2;$$

$$a_{12} = m_2 r_2 (r_1 + r_2) + m_3 [(r_2 + r_3)^2 + r_1 (r_2 + r_3)];$$

$$a_{13} = m_3 r_3 (r_1 + r_2 + r_3); \quad a_{23} = m_3 r_3 (r_2 + r_3);$$

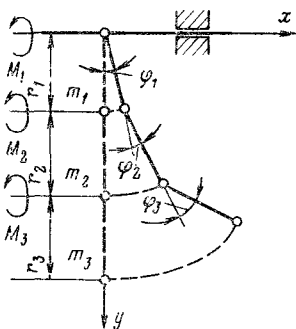


Рис. 2-22. Расчетная механическая схема манипулятора робота.

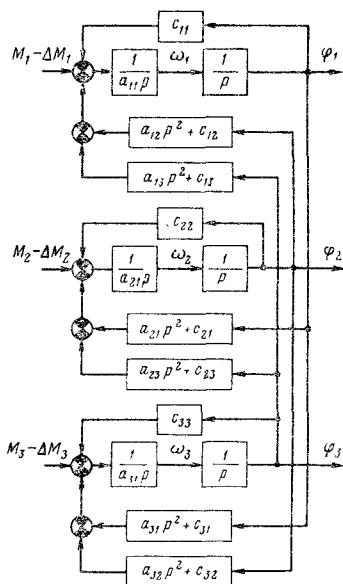


Рис. 2-23. Структурная схема механической части трех электроприводов манипулятора робота.

$$\begin{aligned}
c_{11} &= (m_1 + m_2 + m_3)gr_1 + (m_2 + m_3)gr_2 + m_3gr_3; \\
c_{22} &= m_2gr_2 + m_3g(r_2 + r_3); \quad c_{13} = c_{23} = c_{33} = m_3gr_3; \\
c_{12} &= (m_2 + m_3)gr_2 + m_3gr_3.
\end{aligned}$$

Структурная схема механической части электроприводов рассматриваемого манипулятора, соответствующая уравнениям (2-65), приведена на рис. 2-22. Она подтверждает отмеченную выше особенность установок с несколькими степенями свободы — взаимное влияние электроприводов, которое в структурной схеме отражено наличием перекрестных взаимных связей между каналами регулирования координат системы. Сравнивая рис. 2-23 с рис. 2-21, можно установить, что возрастание числа степеней свободы системы увеличивает число взаимных связей и составление математического описания динамики системы, как это видно из рассмотренного примера, осложняется. С другой стороны, из того же сравнения следует, что наиболее трудно линеаризуемые нелинейности типа произведения переменных возникают при сочетании движений элементов манипулятора в различных плоскостях. Поэтому учет четвертой степени свободы манипулятора, схема которого приведена на рис. 2-22, соответствующей вращению плоскости x, y относительно оси x , требует более громоздких выкладок и дает математическое описание, анализ которого связан с дополнительными трудностями.

Для аналитического исследования динамики систем, уравнения движения которых содержат произведения переменных, можно прибегнуть к разложению в ряд Тэйлора в окрестности точки статического равновесия системы. Однако большое число перекрестных связей и в этом случае может затруднить получение обозримых результатов. Поэтому при необходимости учета взаимодействия электроприводов манипуляторов следует использовать ЭВМ. Синтез же электроприводов отдельных степеней свободы обычно ведут без учета динамического взаимодействия с другими электроприводами. При этом важно правильно выбрать расчетное положение рабочего органа, при котором параметры электромеханической системы привода данной степени свободы принимают неблагоприятные значения. Получение требуемого качества регулирования в этом случае должно обеспечивать нормальную работу данного электропривода при сочетаниях параметров, соответствующих другим положениям взаимодействующих механизмов. Выполнение этого условия должно проверяться моделированием динамики системы с учетом взаимодействия механизмов на ЭВМ.

2-8. ТИПОВЫЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МЕХАНИЗМОВ КОМАНДНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

Рассмотренные особенности статики и динамики типовых общепромышленных механизмов циклического действия позволяют сформулировать общие требования, характерные для электроприводов машин типа командных манипуляторов, в процессе управления которыми принимает постоянное участие оператор. Рабочий процесс таких установок состоит из перемещений рабочего органа машины по требуемым пространственным траекториям, остановки его в любой требуемой точке обслуживаемого пространства и производства манипуляций рабочим органом, предусмотренных конкретной технологией. Постоянное участие оператора позволяет осуществлять эти операции без непрерывного автоматического контроля положения рабочего органа машины, так как этот контроль осуществляется самим оператором на основе получаемой им зрительной информации. При этом для осуществления процесса управления оператор должен иметь возможность воздействием на командоаппараты задавать направление и скорость перемещения рабочего органа по соответствующим пространственным координатам, а электроприводы механизмов, осуществляющие эти перемещения, должны отвечать следующим общим требованиям:

1. Электропривод должен обладать достаточным быстродействием при изменениях скорости и обеспечивать регулирование скорости в диапазоне, необходимом оператору для успешного управления пространственными перемещениями рабочего органа с требуемой точностью.

2. Электропривод должен обеспечивать надежное ограничение момента и тока двигателя допустимыми значениями как в переходных процессах пуска и торможения, так и при механических перегрузках.

3. Электропривод должен обеспечивать ограничение динамических нагрузок механического оборудования, обусловленных наличием упругих связей, зазоров в передачах и сочленениях рабочего оборудования и периодических возмущений, вызываемых кинематическими погрешностями передач.

Проанализируем эти общие требования более детально. Командные сигналы, управляющие движением электроприводов машины, вырабатываются оператором на основании зрительного контроля текущих координат и скоростей перемещения рабочего органа. Поэтому человек-оператор является динамическим звеном системы управления технологическим процес-

сом машины и наиболее благоприятные условия взаимодействия оператора с исполнительными электроприводами имеют место при согласовании динамических характеристик оператора с динамическими свойствами электроприводов. Такое согласование особенно важно для копирующих манипуляторов, однако и для других машин и механизмов, управляемых оператором, согласование быстродействия оператора с быстродействием приводов при отработке задаваемых изменений скорости рабочих движений машины имеет важное практическое значение.

Выполненные исследования [22] показали, что человек-оператор гибко приспосабливается к передаточной функции управляемой системы и действует в направлении стабилизации и оптимизации функционирования установки. Установлено, что при воздействии на командоаппараты отработка оператором элементарных перемещений руки, задаваемых мысленно скачком, может характеризоваться передаточной функцией:

$$W_{\text{оп}}(\bar{p}) = \frac{S(\bar{p})}{S_3(\bar{p})} = \frac{1}{(0,16p + 1)^3}, \quad (2-66)$$

где $S_3(\bar{p})$ и $S(\bar{p})$ — соответственно заданное и текущее перемещение руки оператора.

На основании (2-66) можно заключить, что отработка оператором выработанных на основе зрительной информации управляющих воздействий на командоаппараты осуществляется с запаздыванием, которое можно оценить по данным [22] значением $T_{\text{оп}} = 0,6 \div 0,8$ с.

Отработка электроприводом существенного скачка задания скорости должна протекать за время $t_{\text{рег}} > T_{\text{оп}}$, достаточное для введения оператором корректирующего движение воздействий. Этим ограничивается предельное быстродействие системы электропривода в переходных процессах пуска и торможения. Однако, с другой стороны, значительное превышение $t_{\text{рег}}$ над $T_{\text{оп}}$ также может при определенных условиях затруднять оператору управление машиной. Эти факторы в зависимости от конкретных условий и определяют указанное в п. 1 требование к быстродействию электропривода.

Достаточно точная и быстрая установка рабочего органа машины в намеченное положение требует ограниченной скорости подхода к этому положению, так как при большой скорости визуальная оценка оператором момента подачи команды на отключение привода затрудняется, а ошибки в определении этого момента требуют повторных включений привода, снижающих производительность установки. В связи с этим кон-

критические требования к диапазону регулирования скорости зависят от номинальной скорости механизма и от необходимой точности манипуляций с рабочим органом машины.

Требование ограничения момента и тока двигателя во всех режимах допустимыми значениями предъявляется к электроприводу всегда, исходя из допустимой перегрузочной способности двигателя. Для рассматриваемой группы механизмов это требование, кроме того, связано с необходимостью ограничения нагрузок механического оборудования машины, что при возможности систематических механических перегрузок может выдвигать его на первый план.

Требование, указанное в п. 3, также является общим для всех электроприводов, однако для рассматриваемой группы механизмов, как показано выше, может оказывать решающее влияние на выбор параметров и структуры электромеханической системы привода. Для механизмов, осуществляющих перемещение подвешенных грузов, необходимо предусматривать регулирование момента электропривода в диапазоне 2:1, ограничивать темп нарастания момента и выбирать максимальный момент, исходя из допустимого по условиям раскачивания груза ускорения. Ограничение темпа нарастания момента обеспечивает снижение колебательных динамических нагрузок передач, особенно для механизмов с большим приведенным моментом инерции ($\gamma > 2$). Важным фактором, обеспечивающим снижение динамических коэффициентов нагрузки механического оборудования, является демпфирующее действие, которое оказывает электропривод с линейной механической характеристикой на упругие механические колебания. Поэтому для рассматриваемых механизмов необходимо стремиться к оптимизации электромеханической связи в системе электропривода. Для непосредственного контроля механических нагрузок передач в ряде случаев приходится предусматривать автоматическое регулирование нагрузки упругой связи по отклонению.

Изложенные соображения о требованиях к переходным процессам рассматриваемых электроприводов позволяют сформулировать представления об оптимальном характере переходных процессов электроприводов командных манипуляторов. С точки зрения минимальной длительности рабочего цикла при интенсивном повторно-кратковременном режиме работы желательно иметь минимальную длительность переходных процессов. Однако для уменьшения износа механического оборудования за счет снижения коэффициентов динамичности необходимо ограничивать величину момента двигателя и темп его изменения. Эти противоречивые требования удовлетво-

ряются формированием переходных процессов, показанных для случая пуска электропривода на рис. 2-24.

Кривые 1 и 1' соответствуют пуску с максимальной нагрузкой на валу двигателя $M_{ст, max} = \text{const}$. При этом минимуму длительности пуска отвечают условия $dM/dt = (dM/dt)_{доп} = \text{const}$ на участках изменения момента и $M = M_{доп} = \text{const}$ на участках ограничения его допустимым значением. При уменьшении нагрузки максимальное ускорение привода возрастает,

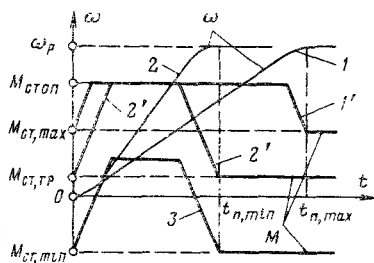


Рис. 2-24. Оптимальный характер переходных процессов электроприводов машин, управляемых оператором.

а время переходного процесса изменения скорости уменьшается, что благоприятно сказывается на длительности цикла. Однако при граничном значении момента $M_{ст} = M_{ст, гр}$ (кривые 2 и 2') время пуска уменьшается до значения $t_{п, min}$, близкого к времени запаздывания оператора $T_{оп}$, и дальнейшее увеличение быстродействия при пуске, как было показано выше, нежелательно. При $M_{ст} < M_{ст, гр}$ должно вступать в действие ограничение максимального ускорения и кривая $\omega = f(t)$, обозначенная цифрой 2, остается неизменной вплоть до $M_{ст} = M_{ст, min}$. При этом максимальный момент при пуске уменьшается (кривая 3 на рис. 2-24).

Таковы общие требования к электроприводам машин типа командных манипуляторов. Полное удовлетворение этих требований определяет необходимость использования систем электропривода, обладающих высокой управляемостью, — систем Г—Д и ТП—Д с двигателем постоянного тока или системы преобразователь частоты — асинхронный двигатель (ПЧ—АД). Широкие возможности этих систем в отношении формирования требуемых статических и динамических характеристик достигаются ценой увеличения габаритов, массы и стоимости электрооборудования, в первую очередь преобразователей. Поэтому для массовых машин при мощности приводов до 100 кВт, примером которых могут служить различные краны, конструкторы стремятся применять наиболее дешевые, простые и надежные системы электропривода, отказываясь в определенной степени от точного выполнения всех рассмотренных требований. При этом учитывается, что выполнение ряда этих требований при ручном управлении может быть возложено на

оператора, например ограничение момента, тока и ускорений в переходных процессах пуска и торможения. Правильное распределение функций управления между оператором и системой автоматического управления электроприводом зависит от данных, назначения и условий работы конкретной установки и составляет важный этап при выборе системы электропривода.

Для электроприводов небольшой мощности при повышенных требованиях к точности манипулирования и для мощных высокопроизводительных машин типа командных манипуляторов во многих случаях необходимо строгое выполнение указанных требований к электроприводу. Для таких электроприводов в настоящее время широко используются замкнутые системы УП—Д (Г—Д или ТП—Д) с главными обратными связями по скорости и току якорной цепи.

В зависимости от вида применяемого усилителя находят применение следующие типовые структуры электропривода: структура с суммирующим усилителем и структура подчиненного регулирования координат [4].

Структура с суммирующим усилителем до недавнего времени, когда основным видом усилителя был магнитный усилитель, находила в рассматриваемых электроприводах преимущественное применение. Это объясняется следующими особенностями магнитного усилителя: магнитное суммирование входных сигналов позволяет наиболее просто вводить сигналы управления с помощью не имеющих потенциальных связей обмоток управления; усилитель отличается высокой надежностью и простотой эксплуатации. В то же время магнитный усилитель обладает невысоким коэффициентом усиления по мощности; электромагнитная инерция ограничивает его быстродействие тем в большей степени, чем выше выходная мощность и чем больше коэффициент усиления по мощности; постоянная времени и габариты реверсивного магнитного усилителя с выходом на постоянном токе увеличиваются по сравнению с нереверсивным в несколько раз из-за невысокого КПД (30—35%) и необходимости двойного комплекта реакторов.

Структурная схема электропривода по системе Г—Д с суммирующим магнитным усилителем представлена на рис. 2-25, а. В схеме обозначены: МУ—магнитный усилитель; k_T , T_T —коэффициент усиления и постоянная времени генератора; $R_{я, \Sigma}$ и $T_{я}$ —сопротивление и электромагнитная постоянная якорной цепи; T_M —электрохимическая постоянная электропривода; s —коэффициент ЭДС двигателя; $u_{0,с}$ и $u_{0,т}$ —напряжения обратных связей по скорости и току якоря. В ряде слу-

часв вместо отрицательной обратной связи по скорости используется отрицательная обратная связь по напряжению двигателя или генератора. Основной особенностью структуры с суммирующим усилителем является использование задержанных связей (отсечек). В данной схеме обе основные связи показаны задержанными; на практике наиболее широко распространена система с одной отсечкой по току.

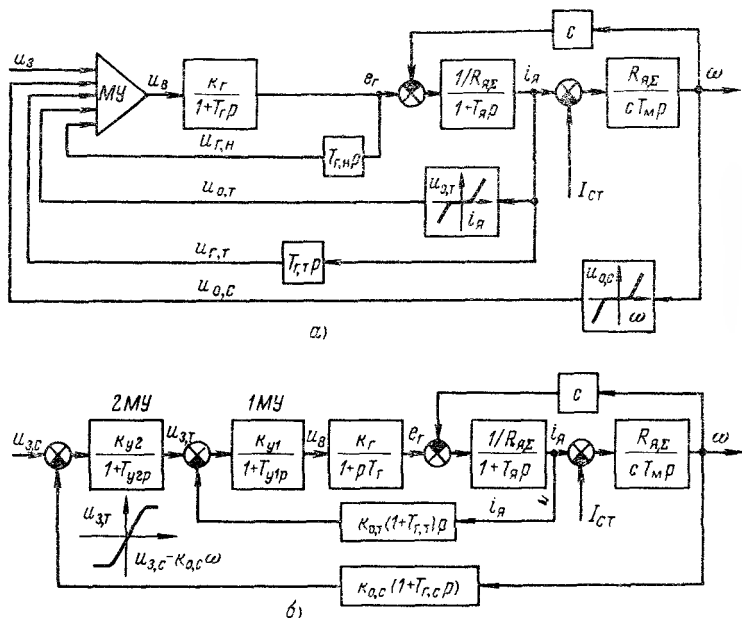


Рис. 2-25. Типовые структуры электроприводов командных манипуляторов по системе УП — Д.

а — с суммирующим усилителем; б — многоконтурная система подчиненного регулирования.

Без применения дополнительных корректирующих связей в такой системе сформировать требуемые статические и динамические характеристики обычно не удастся. Поэтому для получения необходимых динамических показателей качества регулирования тока и скорости в рассматриваемой структуре введены сигналы гибкой связи по ЭДС генератора $u_{Г,Н}$ и гибкой связи по току якоря $u_{Г,Т}$.

Основным недостатком структуры с суммирующим усилителем является взаимное влияние обратных связей, затрудняю-

шее получение оптимальных динамических качеств при регулировании каждой переменной. В наиболее распространенном варианте, когда отсечка по скорости (напряжению) отсутствует, непрерывная жесткая отрицательная связь по скорости (напряжению) неблагоприятно влияет на качество регулирования тока в переходных процессах. Для получения требуемого заполнения экскаваторных характеристик эту связь обычно ослабляют, что влечет за собой ухудшение форсирования процессов возбуждения и гашения поля генератора.

Указанные особенности структуры с суммирующим усилителем привели к созданию схем с магнитными усилителями, имеющих структуру подчиненного регулирования тока и скорости (напряжения). Структурная схема такой системы показана на рис. 2-25, б. Здесь магнитный усилитель 1МУ, является возбудителем генератора и выполняет функции регулятора тока; 2МУ является регулятором скорости (в случае обратной связи по напряжению — регулятором напряжения). Благодаря использованию двухконтурной структуры подчиненного регулирования настройка контура тока является практически независимой от настройки контура регулирования скорости (напряжения). В то же время формирование благоприятных динамических качеств контура тока облегчает настройку внешнего контура регулирования. Структура позволяет при линейных обратных связях получать высокое заполнение экскаваторных характеристик электропривода за счет использования формы характеристики усилителя 2МУ, показанной на структурной схеме.

Схемы с магнитными усилителями еще находят применение в электроприводах общепромышленных механизмов; их особенности рассматриваются в гл. 3 на конкретных примерах. Однако во вновь проектируемых электроприводах предусматриваются полупроводниковые управляемые преобразователи и усилители. Поэтому останавливаться на вопросах расчета схем с магнитными усилителями здесь нет необходимости. Более детального изучения заслуживают общие вопросы использования в электроприводах типа командных манипуляторов перспективных унифицированных структур подчиненного регулирования координат с последовательной коррекцией. Метод расчета параметров и свойства таких систем подробно рассматриваются в курсе теории электропривода [4]. Здесь полезно применить эти сведения для расчета параметров двухконтурной структуры подчиненного регулирования тока и скорости электропривода по системе ТП — Д и проанализировать, в какой степени свойства этой системы отвечают сформулиро-

ванным выше общим требованиям к электроприводу данной группы общепромышленных механизмов.

Пример 2-3. Рассчитать параметры унифицированной структуры подчиненного регулирования тока и скорости двигателя постоянного тока Д810 ($P_{\text{ном}} = 55 \text{ кВт}$; $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$; $I_{\text{ном}} = 282 \text{ А}$), питаемого от реверсивного тиристорного преобразователя ТПР-320/230 ($U_{d, \text{ном}} = 230 \text{ В}$; $I_{d, \text{ном}} = 320 \text{ А}$). Расчетные параметры: $T_{\text{я}} = 0,05 \text{ с}$; $T_{\text{м}} = 0,025 \text{ с}$; $c = 3,65 \text{ В} \cdot \text{с}$; $R_{\text{я}, \Sigma} = 0,074 \text{ Ом}$; $k_{\text{п}} = 25$; $\omega_{0\text{н}} = 60 \text{ 1/с}$; $I_{\text{стоп}} = 600 \text{ А}$; коэффициент передачи тахогенератора $k_{\text{тг}} = 0,5 \text{ В} \cdot \text{с}$.

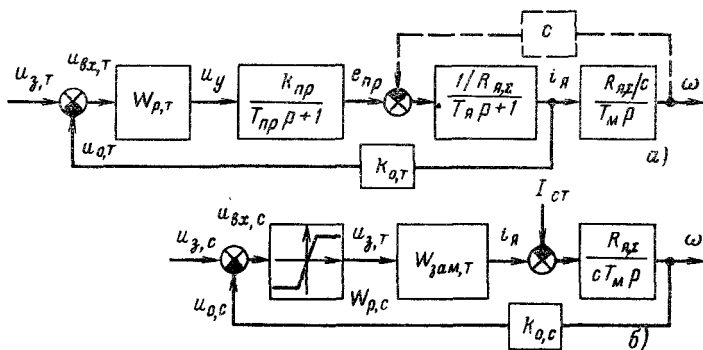


Рис. 2-26. Структурные схемы контуров регулирования тока (а) и скорости (б).

Для построения системы управления электроприводом используем элементы унифицированной блочной системы регуляторов на интегральных микросхемах УБСР-АИ, разработанной институтом ВНИИ-Электропривод. Система состоит из унифицированных элементов-ячеек: операционных и согласующих усилителей, датчиков с гальванической развязкой входных и выходных цепей, фильтров, задающих устройств, различных функциональных преобразователей и источников питания. В системе УБСР-АИ принят унифицированный сигнал $\pm 10 \text{ В}$. Некоторые данные ячейки операционных усилителей У2-АИ:

Количество усилителей	2
Количество входов усилителя	7
Напряжение питания, В	$\pm 12,6$
Выходное напряжение усилителя, В	± 10
Сопротивление нагрузки, кОм	2
Температурный дрейф нуля, приведенный ко входу, мкВ/°С	20
Полоса пропускания при коэффициенте передачи $k_{\text{п}} = 1$, кГц	5

В ячейку входят также узлы ограничения выходного напряжения усилителей, один из которых собран на транзисторах и позволяет изменять предельное напряжение усилителей в диапазоне $1,5-10 \text{ В}$.

а другой — на стабилизаторах и обеспечивает фиксированный уровень ограничения.

Структурная схема контура регулирования тока представлена на рис. 2-26, а. Передаточная функция объекта регулирования тока имеет вид:

$$W_{o,p,t} = \frac{k_{o,t}k_p}{R_{я,\Sigma}(T_{пp} + 1)(T_{яp} + 1)}. \quad (2-67)$$

Постоянная времени $T_{п}$ приближенно учитывает чистое запаздывание преобразователя и малые инерционности системы управления, поэтому ее можно принять в качестве меры для оценки суммарной постоянной некомпенсированных инерционных элементов контура тока, положив $T_{п} = T_{\mu}$. Желаемая передаточная функция разомкнутого контура имеет вид:

$$W_{раз,t} = \frac{1/k_{o,t}}{T_{o,t,p}(T_{\mu p} + 1)} = \frac{1/k_{o,t}}{a_t T_{\mu p}(T_{\mu p} + 1)}, \quad (2-68)$$

где $a_t = T_{o,t}/T_{\mu}$ — соотношение постоянных контура.

Передаточная функция регулятора тока определится так:

$$\begin{aligned} W_{p,t} &= \frac{W_{раз,t}}{W_{o,p,t}} = \frac{T_{яp} + 1}{\frac{k_{o,t}k_p}{R_{я,\Sigma}} a_t T_{\mu p}} \\ &= \frac{T_{яp} + 1}{T_{иp}} = \frac{T_{я}}{T_{и}} + \frac{1}{T_{иp}}, \end{aligned} \quad (2-69)$$

где $T_{и} = \frac{k_{o,t}k_p}{R_{я,\Sigma}} a_t T_{\mu}$.

Используем эти данные для расчета параметров интегрально-пропорционального регулятора тока (ИП-регулятора), схема которого показана на рис. 2-27. Благодаря наличию интегральной составляющей в статическом режиме $u_{3,t} - k_{o,t}I_{я} = 0$. Приняв в качестве максимального задающего сигнала значение $U_{3,t,max} = 8$ В, определим требуемый коэффициент обратной связи по току:

$$k_{o,t} = U_{3,t,max}/I_{я,стоп} = 8/600 = 0,0133 \text{ Ом.}$$

Постоянная интегрирования регулятора тока в соответствии с (2-69), если принять $T_{\mu} = 0,01$ с и $a_t = 2$ (настройка на технический оптимум), составит:

$$T_{и} = \frac{0,0133 \cdot 25}{0,074} \cdot 2 \cdot 0,01 = 0,0925 \text{ с.}$$

Зададимся значением емкости в цепи обратной связи $C_{o,c,t} = 1$ мкФ и определим сопротивление $R_{3,t}$, исходя из выражения постоянной интегрирования ИП-регулятора тока $T_{и} = R_{3,t}C_{o,c,t}$:

$$R_{3,t} = T_{и}/C_{o,c,t} = 0,0925/1 \cdot 10^{-6} = 92,5 \text{ кОм.}$$

Постоянная цепи обратной связи ИП-регулятора $T_{0,с,т} = R_{0,с,т} C_{0,с,т}$. Следовательно,

$$R_{0,с,т} = T_{0,с,т} / C_{0,с,т} = T_{я} / C_{0,с,т} = 0,05 / 1 \cdot 10^{-6} = 50 \text{ кОм}.$$

Примем $R_{0,т} = R_{з,т}$, тогда $k_{0,т} = k_{д,т}$, где $k_{д,т} = U_{з,т} / I_{я}$ — коэффициент датчика тока. Полагая, что источником сигнала, пропорционального току якоря, является шунт с номинальным током $I_{ш,ном} = 600 \text{ А}$ и номинальным падением напряжения $I_{ш,ном} R_{ш} = 75 \text{ мВ}$, можно вычислить коэффициент усиления датчика тока:

$$k_{у,д,т} = U_{д,т} / I_{ш} R_{ш} = U_{з,т,мах} \times \frac{8 \cdot 600}{0,075 \cdot 600} = 107.$$

Перейдем к расчету параметров регулятора скорости. Замыканием цепи обратной связи по скорости и введением в цепь управления регу-

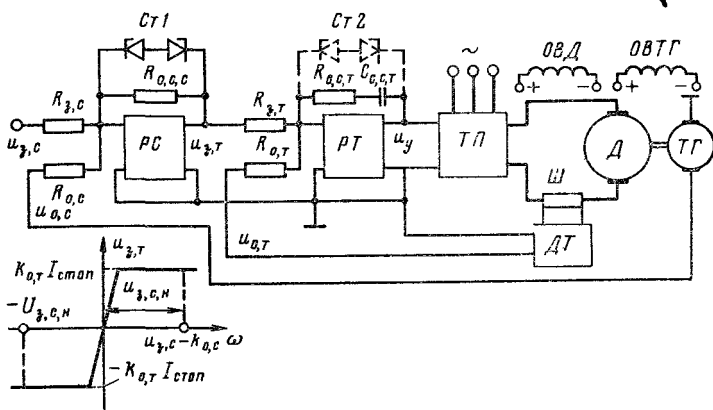


Рис. 2-27. Схема подчиненного регулирования тока и скорости в системе ТП — Д.

лятора скорости с передаточной функцией $W_{р,с}$ получаем второй контур регулирования, структурная схема которого показана на рис. 2-26, б. В прямой цепи этого контура представлена передаточная функция замкнутого оптимизированного контура тока $W_{зам,т}$. Без учета внутренней связи по ЭДС двигателя она имеет следующий вид:

$$W_{зам,т} = \frac{1/k_{0,т}}{a_1 T_{\mu p} (T_{\mu p} + 1) + 1}. \quad (2-70)$$

Передаточную функцию объекта регулирования скорости определим, отбрасывая в (2-70) член второго порядка:

$$W_{0,р,с} = \frac{1/k_{0,т}}{a_1 T_{\mu p} + 1} \frac{R_{я} \xi}{c T_{м p}}. \quad (2-71)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура скорости, если принять $T_{\mu,c} = a_T T_\mu$:

$$W_{\text{раз},c} = \frac{1/k_{0,c}}{a_c a_T T_{\mu,p} (a_T T_{\mu,p} + 1)}. \quad (2-72)$$

Передаточная функция регулятора скорости запишется так:

$$W_{p,c} = \frac{W_{\text{раз},c}}{W_{0,p,c}} = \frac{k_{0,T} c T_M}{k_{0,c} R_{\Sigma} a_c a_T T_\mu}. \quad (2-73)$$

Следовательно, должен быть применен пропорциональный регулятор (П-регулятор) скорости, схема которого показана на рис. 2-27. Примем $R_{3,c} = R_{0,c} = 100 \text{ кОм}$. Тогда $k_{0,c} = k_{T,r}$. Так как для пропорционального регулятора $W_{p,c} = R_{0,c}/R_{3,c}$, с помощью (2-73) можно определить сопротивление цепи обратной связи регулятора скорости:

$$\begin{aligned} R_{0,c,c} &= R_{3,c} \frac{k_{0,T} c}{k_{0,c} R_{\Sigma}} \frac{T_M}{a_c a_T T_\mu} = \\ &= 100 \frac{0,0133 \cdot 3,65}{0,5 \cdot 0,074} \frac{0,25}{2 \cdot 2 \cdot 0,01} = 82 \text{ кОм}. \end{aligned}$$

Стабилитроны $Cm1$ в цепи обратной связи регулятора скорости (рис. 2-27), включенные для ограничения его выходного напряжения, должны быть выбраны на напряжение $U_{3,T,max} = I_{\text{стоп}} k_{0,T} = 8 \text{ В}$.

Напряжение $u_{3,c}$, требуемое для получения заданного значения скорости идеального холостого хода привода $\omega_{\text{ном}}$:

$$U_{3,c,\text{ном}} = k_{0,c} \omega_{\text{ном}} = 0,5 \cdot 60 = 30 \text{ В}.$$

Если в качестве источника задающего напряжения $u_{3,c}$ используется задатчик интенсивности с унифицированным выходным сигналом $U'_{3,c,\text{ном}} = 10 \text{ В}$, сопротивление $R_{3,c}$ должно быть уменьшено в отношении $U_{3,c,\text{ном}}/U'_{3,c,\text{ном}}$, т. е. в 3 раза. Для ограничения ЭДС преобразователя значением $E_{\text{п,доп}}$ следует определить соответствующее напряжение управления $U_{\text{удоп}} = E_{\text{п,доп}}/k_p$ и ограничить этим значением выходное напряжение регулятора тока (стабилитроны $Cm2$ на рис. 2-27).

Рассчитаем статическую электромеханическую характеристику синтезированного электропривода при $u_{3,c} = U_{3,c,\text{ном}} = 30 \text{ В}$. Ее форма определяется зависимостью $u_{3,T} = f(u_{3,c} - k_{0,c} \omega)$, показанной на рис. 2-27. Уравнение механической характеристики при линейной характеристике регулятора скорости можно получить из условия $(u_{3,c} - k_{0,c} \omega) W_{p,c} = k_{0,T} I_a$, так как в статическом режиме напряжение на входе ИП-регулятора тока должно быть равно нулю. С учетом (2-73)

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{u_{3,c}}{k_{0,c}} - \frac{R_{\Sigma}}{c} \frac{a_c a_T T_\mu}{T_M} I_a = \\ &= \omega_0 - \frac{a_c a_T T_\mu}{T_M} \Delta \omega_c, \end{aligned} \quad (2-74)$$

где $\omega_0 = u_{3,c}/k_{0,c}$ — скорость идеального холостого хода;

$\Delta \omega_c = I_a R_{\Sigma} / c$ — статический перепад скорости в разомкнутой системе УП — Д.

При $\omega \leq \omega_{\text{гр}}$

$$(u_{3,c} - k_{0,c}\omega_{\text{гр}}) W_{p,c} = k_{0,T} I_{\text{стоп}}$$

(см. характеристику регулятора скорости на рис. 2-27). В этой области регулятор скорости выдает постоянное напряжение $u_{3,T} = U_{3,T,\text{max}} = \text{const}$, поэтому уравнение электромеханической характеристики имеет вид:

$$I_{\text{я}} = I_{\text{стоп}} = \text{const.} \quad (2-75)$$

В рассматриваемом примере $\omega = \omega_{\text{ном}} = 60$ 1/с, $a_c = a_T = 2$, следовательно,

$$\omega = 60 - \frac{0,074}{3,65} \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,01}{0,25} I_{\text{я}} = 60 - 0,032 I_{\text{я}}$$

При $I_{\text{я}} = I_{\text{стоп}} = 600$ А

$$\omega = \omega_{\text{гр}} = 60 - 0,032 \cdot 600 = 41 \text{ рад/с.}$$

По этим данным на рис. 2-28, а построена статическая характеристика $\omega = f(I_{\text{я}})$ (кривая 1). Там же штриховой линией 2 показана естественная характеристика электропривода в разомкнутой системе УП — Д.

В связи с инерционностью ИП-регулятора тока и наличием внутренней связи по ЭДС в переходных процессах регулирование тока якоря производится с ошибкой, установившееся значение которой ΔI_{ω} при линейном изменении скорости с ускорением $\varepsilon = \text{const}$ можно вычислить с помощью соотношений [4]:

$$\Delta I_{\omega} = \frac{a_T T_{\mu} c}{R_{\text{я}\Sigma}} \varepsilon; \quad (2-76)$$

$$\Delta I_{\omega} = \frac{I_{\text{стоп}} - I_{\text{ст}}}{1 + T_{\text{м}}/a_T T_{\mu}}, \quad (2-77)$$

где $I_{\text{ст}} = M_{\text{ст}}/c$ — ток статической нагрузки.

Оценим характер зависимостей ω , $i_{\text{я}} = f(t)$ в переходном процессе пуска с $I_{\text{ст}} = 0,2 I_{\text{стоп}}$ при скачке задания $u_{3,c} = U_{3,c,\text{ном}}$. При этом в соответствии с (2-77)

$$\Delta I_{\omega} = \frac{600 - 0,2 \cdot 600}{1 + 0,025/2 \cdot 0,01} = 213 \text{ А.}$$

Установившееся значение тока при пуске:

$$I_{\text{п}} = I_{\text{стоп}} - \Delta I_{\omega} = 600 - 213 = 387 \text{ А.}$$

Установившееся ускорение $\varepsilon_{\text{уст}}$ определим из (2-76):

$$\varepsilon_{\text{уст}} = \frac{\Delta I_{\omega} R_{\text{я}\Sigma}}{a_T T_{\mu} c} = \frac{213 \cdot 0,074}{2 \cdot 0,01 \cdot 3,65} = 216 \text{ рад/с}^2.$$

Оценим время нарастания тока от начального значения $I_{\text{я}} = I_{\text{ст}} = 120$ А до $I_{\text{я}} = I_{\text{п}}$. При настройке на технический оптимум $a_T = 2$

$$t_1 = 4,7 T_{\mu} = 4,7 \cdot 0,01 = 0,047 \text{ с.}$$

Пренебрегая участком нарастания тока, оценим время пуска до скорости $\omega_{гр}$:

$$t_2 \approx \omega_{гр} / \varepsilon_{уст} = 41 / 216 = 0,19 \text{ с.}$$

Время нарастания скорости от $\omega_{гр}$ до ω_c при настройке контура скорости на технический оптимум можно принять

$$t_3 \approx 4,7 a_c T_{\mu} = 2 t_1 = 2 \cdot 0,047 = 0,094 \text{ с.}$$

По этим данным с учетом того, что при настройке на технический оптимум перерегулирование не превышает 5%, на рис. 2-28, б построены приближенные зависимости ω , $i_a = f(t)$. С их помощью получена динамическая электромеханическая характеристика, которая представлена кривой 3 на рис. 2-28, а.

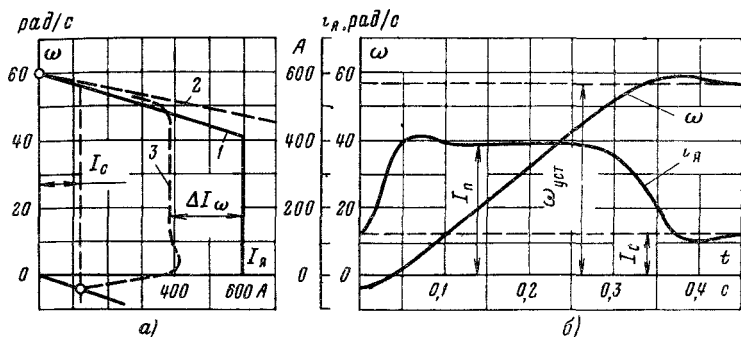


Рис. 2-28. Механические характеристики (а) и переходный процесс (б) в схеме, приведенной на рис. 2-27.

Для ориентировочной оценки реакции электропривода на внутренние механические возмущения, возникающие в процессе пуска при наличии кинематических погрешностей передач, воспользуемся выражением динамической жесткости механической характеристики [4]. На основной части процесса пуска обратная связь по скорости отсутствует, так как регулятор скорости имеет на выходе постоянный сигнал $u_{3,t} = U_{3,t,max} = \text{const}$, задающий неизменное значение тока якоря. На основании структурной схемы для этого режима, приведенной на рис. 2-26, а, с учетом внутренней обратной связи по ЭДС можно после преобразований получить следующее выражение искомой динамической жесткости:

$$\beta_{дин}(\bar{p}) = \frac{M(\bar{p})}{\omega(\bar{p})} = - \frac{\beta a_{\tau} T_{\mu} p (1 + p T_{\mu})}{(1 + p T_{\mu}) (1 + p a_{\tau} T_{\mu} + p^2 a_{\tau} T_{\mu}^2)}, \quad (2-78)$$

где $\beta = c^2 / R_{\Sigma}$ — модуль жесткости статической механической характеристики в разомкнутой системе УП — Д.

В данном примере $\beta = 3,65^2 / 0,074 = 180 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$, $T_{\mu} = 0,05 \text{ с}$, $a_{\tau} = 2$, $T_{\mu} = 0,01 \text{ с}$. Подставляя эти данные в (2-78), можно получить асимпто-

тическую ЛАЧХ и ЛФЧХ динамической жесткости, которые построены на рис. 2-29.

Полученные аналитические и графические зависимости дают достаточно полное представление о свойствах унифицированной двухконтурной системы регулирования тока и скорости при настройке на технический оптимум. Воспользуемся примером 2-3 для анализа соответствия этих свойств сформулированным выше трем основным требованиям к электроприводам

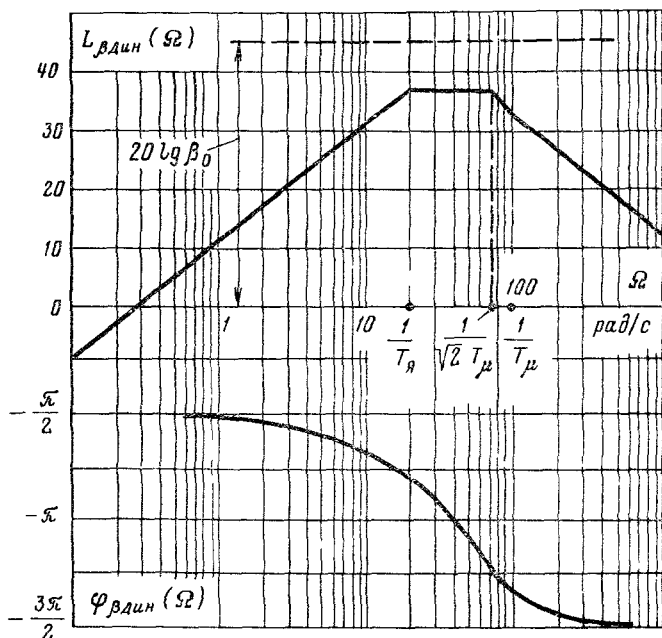


Рис. 2-29. Асимптотическая ЛАЧХ и ЛФЧХ динамической жесткости в схеме, приведенной на рис. 2-27.

машин типа командных манипуляторов. При настройке на технический оптимум жесткость рабочего участка характеристики $\omega = f(M)$ зависит от отношения $T_M/4T_{\mu}$: при $T_M \gg 4T_{\mu}$ система обеспечивает увеличение жесткости в $T_M/4T_{\mu}$ раз по сравнению с разомкнутой системой. При одинаковом модуле жесткости β в разомкнутой системе модуль жесткости в замкнутой системе больше у электропривода того механизма, который имеет больший момент инерции. Выше было установлено, что одноконцевые подъемные лебедки, как правило, обладают малым

приведенным к валу двигателя моментом инерции и в то же время к их электроприводам предъявляются высокие требования в отношении диапазона регулирования скорости.

Напротив, многие механизмы передвижения и поворота имеют большой момент инерции, но для демпфирования колебаний груза требуют смягчения рабочего участка механической характеристики. Нетрудно видеть, что свойства полученной системы в указанных случаях могут находиться в противоречии с требованиями к электроприводу. Пример 2-3 подтверждает этот вывод. Заданное значение $T_m = 0,025$ с соответствует электроприводу механизма подъема, у которого основную долю в суммарном моменте инерции J_Σ составляет момент инерции ротора двигателя. Полученная жесткость рабочего участка механических характеристик (рис. 2-28, а) меньше, чем жесткость характеристик в разомкнутой системе УП — Д, и не может удовлетворить предъявляемым требованиям.

Зависимости на рис. 2-28, б свидетельствуют о том, что система обладает высоким быстродействием, которое может превышать время реакции оператора. Как правило, для электроприводов рассматриваемой группы требуемое время отработки скачка задания скорости при малых нагрузках $t_n \approx 0,8 \div 1$ с, а полученное время $t_n = 0,35$ с. Данный пример показывает, что без принятия специальных мер система не обеспечивает ограничения ускорений при малых нагрузках и моментах инерции привода.

Точность регулирования тока и момента в процессе пуска, полученная в примере, невысока: ошибка ΔI_ω составляет 35,5% стопорного тока. Для процесса пуска с малой нагрузкой необходимо ограничение ускорений, поэтому допустимы и большие значения ΔI_ω . Однако в процессах резких стопорений электропривода может требоваться более точное ограничение тока якоря.

Третье требование, устанавливающее необходимость ограничения динамических нагрузок механического оборудования, без принятия дополнительных мер свойствами синтезированной системы во многих отношениях также не может быть обеспечено. Для уменьшения упругих колебаний необходимо снизить темп нарастания момента и тока, а в данной системе ток нарастает до стопорного значения за время $t_1 = 4,7 T_m$, т. е. за 0,05 с. Для плавного выбора зазоров требуется ограничение ускорений в период выбора зазоров — в данной системе, как уже было отмечено, ограничение ускорений отсутствует и удары при выборе зазоров могут недопустимо увеличивать износ передач.

Ограничить темп нарастания тока якоря или ускорение в данном контуре можно введением подчиненных контуров регулирования этих величин. Однако увеличение числа контуров регулирования при последовательной коррекции повышает некомпенсируемую постоянную внешнего контура регулирования, поэтому на практике применяется редко. В ряде случаев для этой цели используют структуру подчиненного регулирования тока и скорости, дополненную устанавливаемым на входе системы задатчиком интенсивности. При использовании такой структуры следует иметь в виду, что данный способ ограничения ускорений весьма эффективен в случаях, когда требуется формировать стабильную зависимость $\omega = f(t)$, независимую от нагрузки (см. гл. 4). Для электроприводов командных манипуляторов требуется формировать при $\varepsilon \leq \varepsilon_{\text{доп}}$ стабильную диаграмму момента $M = f(t)$ (см. рис. 2-24). При этом задание на входе стабильной зависимости $\omega_3 = f(t)$ с ускорением $\varepsilon_3 = \varepsilon_{\text{доп}}$ приводит в переходных процессах с большим $M_{\text{ст}}$, когда фактическое ускорение привода ограничивается токовой связью, к запаздываниям в обработке задаваемых оператором сигналов.

В этом можно убедиться, анализируя процессы на рис. 2-30. Здесь показан процесс пуска с $M_{\text{ст}} = M_{\text{ст, max}} = \text{const}$, при котором $\varepsilon = \varepsilon_{\text{min}} \ll \varepsilon_3 = \varepsilon_{\text{доп}}$. Так как ускорение ε_{min} много меньше ускорения, задаваемого задатчиком интенсивности, изменения скорости отстают от заданной зависимости $\omega_3(t)$. Если при этом в связи с изменением ситуации оператор в момент времени $t = t'$ даст команду на замедление, электропривод не перейдет в тормозной режим до тех пор, пока задаваемое значение скорости ω_3 не сблизится с продолжающей возрастать фактической скоростью $\omega = \varepsilon_{\text{min}} t$. Время запаздывания реакции системы на команду оператора $\Delta t_{\text{зап}}$ приводит к хорошо видимому на рисунке перерегулированию по скорости. Избежать его оператор может, давая команду на торможение с упреждением, однако такое очевидное усложнение процесса управления не может быть признано целесообразным. Поэтому применение задатчиков интенсивности для рассматриваемых электроприводов нежелательно. Ограничение ускорений в легких переходных процессах должно обеспечиваться внутренними свойствами схемы (см. § 3-7).

При оценке условий ограничения упругих колебаний, обусловленных влиянием кинематических погрешностей передач, наличие ошибки регулирования тока следует отнести к положительным качествам системы. Если бы в переходных режимах не было отклонений от статической характеристики, ток якоря

в процессе пуска оставался бы постоянным, при этом $\beta = 0$, что, как было показано выше, полностью исключает демпфирующее действие электропривода при возникающих резонансных колебаниях.

В синтезированной структуре благодаря инерционности регулятора тока модуль динамической жесткости на частоте резонанса может оставаться достаточно высоким, что и обеспечит сохранение демпфирующей способности электропривода

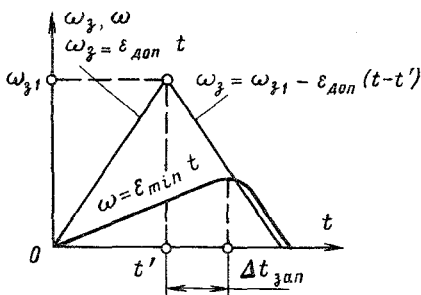


Рис. 2-30. Работа электропривода, схема которого показана на рис. 2-27, с задатчиком интенсивности при $\epsilon_z = \epsilon_{доп}$.

при модуле жесткости статической характеристики, равном нулю. Наглядным подтверждением сказанного являются рассчитанные в примере ЛАЧХ и ЛФЧХ динамической жесткости в зоне ограничения тока (рис. 2-29). Действительно, при изменении частоты возмущений от 0 до 20 рад/с модуль жесткости увеличивается и в зоне частот от 10 до 100 рад/с (1,6–16 Гц) близок к модулю статической жесткости β в разомкнутой системе УП – Д, а сдвиг по фазе лежит в области, близкой к 180° . В этом диапазоне резонансные колебания могут эффективно демпфироваться электроприводом, если приведенный момент инерции механизма превышает момент инерции двигателя.

На основании приведенного анализа можно отметить следующие достоинства рассмотренной типовой структуры электропривода командных манипуляторов:

1. Система обеспечивает возможность формирования экскаваторных характеристик с высоким заполнением простыми средствами.

2. Подбор параметров системы регулирования, обеспечивающих определенные динамические качества электропривода, осуществляется предельно простым инженерным методом, имеющим приемлемую для практики точность.

3. Благодаря инерционности регулятора тока система отфильтровывает высокие частоты, что обеспечивает сохранение

демпфирующей способности привода на высоком уровне при абсолютно мягкой статической характеристике.

4. Как и все системы, имеющие структуру подчиненного регулирования, рассматриваемая система проста в наладке и эксплуатации.

Вместе с тем из того же анализа следует ряд недостатков рассмотренной структуры:

1. Жесткая связь между коэффициентом обратной связи и динамическими свойствами контура регулирования предопределяет жесткость рабочего участка механической характеристики, которая может находиться в противоречии с требованиями к данному электроприводу.

2. Точность регулирования тока и момента при механических перегрузках и резких стопорениях может быть ниже требуемой.

3. Система не обеспечивает ограничения ускорений в легких переходных процессах (пуск на спуск, торможение в конце подъема), когда точность поддержания тока в динамике достаточно высока, а также при выборе зазоров в передачах и слабину канатов.

В тех случаях, когда указанные недостатки существенно затрудняют получение требуемых статических характеристик и динамических показателей электропривода, в рассмотренную структуру вводятся дополнительные элементы и корректирующие связи. Примеры таких схем рассматриваются в гл. 3.

Глава третья

ПРИМЕРЫ СХЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МАШИН, УПРАВЛЯЕМЫХ ОПЕРАТОРОМ

3-1. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ

Из приведенного в гл. 1 обзора машин и механизмов общепромышленного применения можно заключить, что подъемные краны различной конструкции и назначения являются наиболее характерными установками, основные рабочие движения которых осуществляются типовыми общепромышленными механизмами — подъемными лебедками, механизмами передвижения и механизмами поворота. Как правило, подъемные краны имеют неавтоматизированный рабочий цикл, который на всех участках осуществляется по командам оператора. Таким образом, механизмы кранов являются типичными позиционными механизмами с ручным управлением и к их электроприводам

предъявляется комплекс рассмотренных выше общих требований, характерных для электроприводов машин типа командных манипуляторов.

Вместе с тем массовость применения и весьма тяжелые условия работы электроприводов крановых механизмов определяют весьма жесткие требования в отношении простоты их эксплуатации и высокой надежности работы. Поэтому при проектировании крановых электроприводов конструкторы стремятся к использованию максимально простых систем электропривода и их схем управления даже за счет некоторого снижения требований к статическим характеристикам и динамическим свойствам приводов.

Так как подъемные краны на всех этапах работы управляются оператором, главным технологическим требованием, влияющим на выбор системы электропривода, является требование регулирования скорости. Требуемый диапазон регулирования скорости D определяется отношением рабочей скорости к минимальной, необходимой по условиям работы. Минимальная скорость для механизмов подъема ограничивается условиями мягкой установки груза в назначенное место без недопустимого толчка. При управлении механизмами передвижения регулирование скорости облегчает оператору остановку механизмов с необходимой точностью, сокращает число необходимых для этой цели повторных включений привода.

Условия посадки грузов и необходимая точность их установки определяются назначением крана. Для монтажных кранов, выполняющих точные операции, для кранов, транспортирующих хрупкие детали, и в других аналогичных случаях требуется при прочих равных условиях меньшее значение скорости, чем для кранов универсального назначения. Поэтому требуемый диапазон регулирования выше у специальных кранов и возрастает при увеличении рабочей скорости механизма.

Управление скоростью электропривода должно осуществляться при наложенных на ускорение, ток и момент ограничениях. Рабочие скорости основных механизмов большинства кранов таковы, что при нормированных допустимых средних ускорениях суммарное время переходных процессов составляет небольшую долю общего времени цикла. При этом условия регулирования момента и соответствующий характер переходных процессов на производительность крана существенного влияния не оказывают и точного воспроизведения рассмотренных в гл. 2 оптимальных законов движения обычно не требуется. Однако при проектировании следует оценивать влияние раскачивания грузов, кинематических зазоров и т. п. и при необходи-

мости принимать дополнительные меры для ограничения динамических нагрузок.

Для механизмов подъема в электрических талях, для механизмов передвижения талей и неответственных кранов регулирование скорости не предусматривается. В этих случаях успешно применяется простейший асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Для большинства универсальных мостовых и поворотных кранов удовлетворительная управляемость механизмов обеспечивается при диапазоне $D = 2 \div 3$. В связи с этим наиболее массовое применение на кранах находит асинхронный двигатель с фазным ротором, регулируемый переключением сопротивлений в роторной цепи.

Асинхронный двигатель с фазным ротором не обеспечивает жестких регулировочных характеристик для спуска грузов со скоростью ниже синхронной. Как следствие во многих случаях применения этого вида привода его регулировочные свойства не являются удовлетворительными. Стремление расширить область применения простого, надежного и дешевого асинхронного двигателя вынуждает конструкторов искать новые схемные решения, улучшающие его регулировочные свойства. Приступая к обзору применяемых систем крановых электроприводов с асинхронными двигателями, можно выделить следующие основные направления в их развитии:

- 1) использование принципа сложения механических характеристик в двухдвигательном электроприводе;
- 2) использование динамического торможения с самовозбуждением для расширения диапазона регулирования скорости двигателей с фазным ротором при спуске грузов;
- 3) использование для регулирования скорости тиристорных регуляторов напряжения с обратной связью по скорости;
- 4) использование многоскоростных крановых асинхронных двигателей;
- 5) использование частотного управления асинхронным электроприводом.

Двухдвигательный асинхронный электропривод с общим механическим валом применяется для крановых механизмов в тех случаях, когда требуется снизить момент инерции или необходимо увеличить вдвое мощность привода при заданной мощности серийного двигателя, а также по различным конструктивным соображениям. Наличие двух двигателей, работающих на общий вал, обеспечивает дополнительные возможности регулирования момента и скорости электропривода за счет формирования требуемых результирующих механических характеристик путем воздействия на форму механических ха-

рактических характеристик каждого двигателя в отдельности [4]. Поэтому в ряде случаев вторая машина (меньшей мощности) добавляется к основному двигателю только для улучшения регулировочных характеристик электропривода.

На рис. 3-1, а приведена схема двухдвигательного электропривода механизма подъема, в котором вал основного асинхронного двигателя с фазным ротором АД соединен с валом специальной тормозной машины ТМ. Тормозная машина

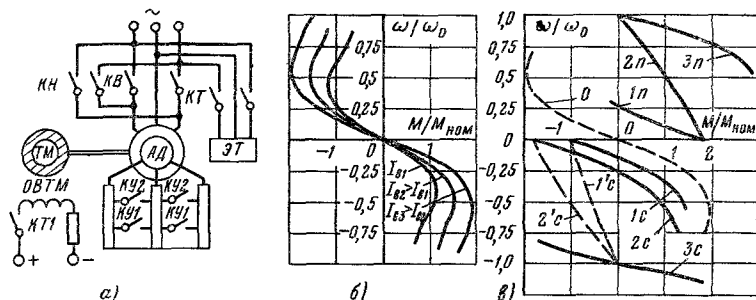


Рис. 3-1. Регулирование скорости с помощью вихревого генератора.

представляет собой генератор вихревых токов, состоящий из статора с обмоткой возбуждения ОВТМ, которая питается постоянным током, и массивного ротора. При вращении в магнитном поле в его стали наводятся вихревые токи и возникает тормозной момент, зависимость которого от скорости и от тока возбуждения показана на рис. 3-1, б.

Семейство механических характеристик, которое обеспечивается включением и отключением контакторов в схеме на рис. 3-1, а, представлено на рис. 3-1, в. Управление электроприводом осуществляется с помощью командоконтроллера, в нулевом положении которого все указанные на схеме контакторы отключены, электропривод заторможен механическим тормозом. При подъеме грузов в первом положении командоконтроллера включены контакторы КВ, КТ, КТТ и КУ. При этом электромагнит ЭТ освобождает шкив тормоза, тормозная машина возбуждается и развивает момент в соответствии с характеристикой 0 на рис. 3-1, в, а асинхронный двигатель работает в направлении «подъем» с характеристикой 2n. Результирующая характеристика 1n соответствует суммированию моментов, определяемых характеристиками 0 и 2n при каждой скорости. Она обладает сравнительно высокой жесткостью

и обеспечивает устойчивую малую скорость подъема груза. Вторая ступень скорости подъема получается путем отключения контактора $КТ1$ — тормозная машина теряет возбуждение и момента не развивает (характеристика $2n$). Переход на третью, основную скорость достигается включением контактора $КУ2$. В цепи ротора остается небольшое добавочное сопротивление и двигатель имеет механическую характеристику $3n$ (рис. 3-1, в).

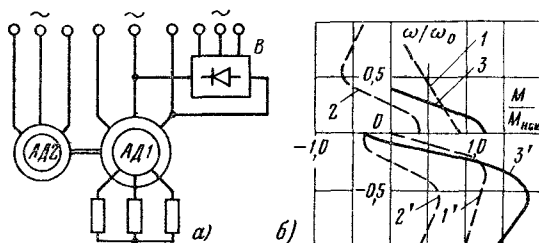


Рис. 3-2. Схема электропривода с дросселем насыщения (а) и соответствующие механические характеристики (б).

При спуске грузов в первом положении командоконтроллера включаются контакторы $КН$, $КТ$ и $КТ1$. Первая скорость спуска обеспечивается характеристикой привода $1с$, которая получается суммированием моментов тормозной машины и двигателя, определяемых соответственно характеристиками 0 и $1'$ с. Для увеличения скорости спуска во втором положении включается контактор $КУ$. При этом суммарная характеристика $2с$ определяется характеристиками 0 и $2'с$. Основная третья скорость спуска обеспечивается отключением возбуждения тормозной машины и уменьшением сопротивления в цепи ротора до минимального значения (характеристика $3с$, рис. 3-1, в).

В схеме на рис. 3-2, а с той же целью к валу основного двигателя $АД1$ присоединен вспомогательный тихоходный асинхронный двигатель $АД2$. Для получения жесткой механической характеристики 3 (рис. 3-2, б) при подъеме грузов с малой скоростью используется суммирование моментов, развиваемых основным двигателем $АД1$ при введении сопротивления в цепь ротора (характеристика 1) и вспомогательной машиной $АД2$ (характеристика 2). Для спуска грузов с пониженной скоростью основной двигатель $АД1$ переводится в режим динамического торможения (две фазы статорной обмотки подключаются к выпрямителю $В$, рис. 3-2, а). Соответствующая механическая характеристика $1'$ суммируется с механической характеристикой

2' двигателя АД2, чем и обеспечивается достаточно жесткая результирующая характеристика двухдвигательного электропривода 3' (рис. 3-2, б).

Введение на вал основного двигателя дополнительной машины во многих практических случаях нежелательно по конструктивным соображениям. Поэтому для подъемных лебедок кранов более универсальным способом получения устойчивых скоростей спуска грузов является использование режима динамического торможения асинхронного двигателя с самовозбуждением. Реализация самовозбуждения возможна только при применении асинхронного двигателя с фазным ротором. Соответствующая схема силовых цепей привода показана на рис. 3-3. В режиме динамического торможения с самовозбуждением контактор $K1$ отключен, а $K2$ включен. При этом питание обмотки статора осуществляется от роторной цепи двигателя через выпрямитель B . Включенные в цепь ротора добавочные сопротивления $R_{2д}$ используются в качестве делителей напряжения, позволяющих регулировать связь между током ротора и током статора для получения требуемых условий самовозбуждения.

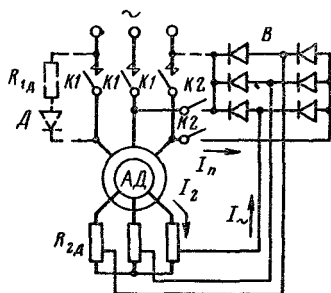


Рис. 3-3. Схема динамического торможения асинхронного электропривода с самовозбуждением.

Схема замещения фазы асинхронного двигателя в режиме питания от источника тока, частным случаем которого является динамическое торможение [4] при частоте тока $f_1 = 0$, синхронной скорости $\omega_0 = 0$ и абсолютном скольжении $s_a = -\omega/\omega_{0ном}$, где $\omega_{0ном}$ — синхронная скорость при номинальной частоте $f_{1ном} = 50$ Гц, приведена на рис. 3-4, а, а соответствующая ей векторная диаграмма — на рис. 3-4, б. На основании схемы замещения и векторной диаграммы можно записать следующие уравнения, определяющие статическую механическую характеристику двигателя в режиме динамического торможения:

$$\left. \begin{aligned} E_2'^2 &= I_\mu^2 x_\mu^2 = I_2'^2 [(R_2'/s_a)^2 + x_2'^2]; \\ I_{2к}^2 &= I_\mu^2 + I_2'^2 + 2I_2'^2 x_2'/x_\mu; \\ M &= 3I_2'^2 R_2'/\omega_{0н} s_a, \end{aligned} \right\} \quad (3-1)$$

где $I_{\text{эк}}$ — эквивалентный трехфазный переменный ток статора;

I_{μ} — намагничивающий ток;

I'_2 — приведенный ток ротора;

$x_{\mu} = E_1/I_{\mu}$ — реактивное сопротивление намагничивания;

E_1, E'_2 — ЭДС фазы статора и ротора;

R'_2, x'_2 — приведенные активное и реактивное сопротивления ротора.

Если цепи, показанные на рис. 3-3 пунктирными линиями, не учитывать, связь между эквивалентным током статора и приведенным током ротора в рассматриваемой схеме можно представить следующим соотношением:

$$I_{\text{эк}} = \frac{k_{\text{сх}} k_{\text{ш}} k_{\text{т}}}{k_{\text{в}}} I'_2 = k_{\text{с}} I'_2, \quad (3-2)$$

где $k_{\text{сх}} = I_{\text{кв}}/I_{\text{п}}$ — коэффициент схемы включения статорной обмотки;

$I_{\text{п}}$ — постоянный ток на выходе выпрямителя B ;

$k_{\text{в}} = I_{\sim}/I_{\text{п}}$ — коэффициент схемы выпрямления;

$k_{\text{ш}} = I_{\sim}/I'_2$ — коэффициент шунтирования выпрямителя;

$k_{\text{т}}$ — коэффициент трансформации двигателя;

$k_{\text{с}}$ — коэффициент связи.

Подставив (3-2) во второе уравнение системы (3-1), после преобразований получим уравнение, связывающее намагничивающий ток I_{μ} с током ротора I'_2 при самовозбуждении:

$$I_{\mu}^2 = I'^2_2 (k_{\text{с}}^2 - 1 - 2 x'_2/x_{\mu}). \quad (3-3)$$

С другой стороны, первое уравнение системы (3-1) связывает ток ротора I'_2 с вызывающей его ЭДС E_1 , а следовательно, и намагничивающим током I_{μ} :

$$I_{\mu}^2 = I'^2_2 \frac{(R'_2/s_a)^2 + x'^2_2}{x_{\mu}^2}. \quad (3-4)$$

Процесс самовозбуждения возможен только в том случае, если при данном значении тока I'_2 ток I_{μ} , определяемый формулой (3-3), равен или больше тока, определяемого формулой (3-4). Отсюда вытекает следующее аналитическое условие самовозбуждения двигателя в рассматриваемой схеме:

$$k_{\text{с}}^2 - (1 + x'_2/x_{\mu})^2 \geq (R'_2/x_{\mu} s_a)^2, \quad (3-5)$$

причем знак равенства соответствует режиму критического самовозбуждения.

Анализируя (3-5), можно установить, что при $k_c \leq 1 + x'_2/x_\mu$ условия для самовозбуждения двигателя отсутствуют при любой скорости и при любом скольжении s_a . Если $k_c > 1 + x'_2/x_\mu$ самовозбуждение возможно, но наступает при определенном граничном значении скольжения $s_{a,гр}$, которое зависит от сум-

Рис. 3-4. Схема замещения фазы асинхронного двигателя при динамическом торможении (а) и соответствующая векторная диаграмма (б).

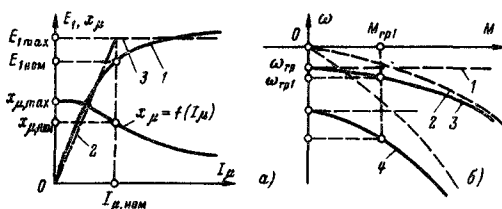
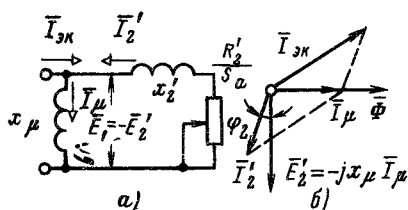


Рис. 3-5. Зависимость E_1 , $x_\mu = f(I_\mu)$ (а) и механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения с самовозбуждением.

марного сопротивления фазы ротора R'_2 . Решив (3-5) относительно граничного скольжения, получим:

$$s_{a,гр1} = \frac{\pm R'_2}{x_\mu \sqrt{k_c^2 - (1 + x'_2/x_\mu)^2}}. \quad (3-6)$$

Таким образом, в интервале изменения скорости от 0 до $\omega_{гр} = -s_{a,гр}\omega_{ном}$ условия самовозбуждения отсутствуют и механическая характеристика совпадает с осью ординат ($M = 0$). При $\omega = \omega_{гр}$ двигатель самовозбуждается и его момент быстро увеличивается до значения, определяемого движущим моментом нагрузки $M_{ст}$. Если заменить реальную характеристику намагничивания (кривая 1 на рис. 3-5, а) прямой 2, т. е. принять $x_\mu \approx x_{\mu, max} = \text{const}$, условие (3-5) при $s_a = s_{a,гр}$ будет выполняться в виде равенства при любом значении $M_{ст}$. Следовательно, при линейной характеристике намагничивания механическая характеристика электропривода выражается равенством $\omega = \omega_{гр} = \text{const}$ (прямая 1 на рис. 3-5, б). Принятая линеаризация кри-

вой намагничивания справедлива лишь в пределах $I_\mu < I_{\mu, \text{ном}}$. При $I_\mu > I_{\mu, \text{ном}}$ магнитная цепь машины насыщается и реальную характеристику намагничивания можно приближенно заменить прямой 3 (рис. 3-5, а), положив $E_1 = E'_2 \approx E_{1, \text{max}} = \text{const}$. В этой области механическая характеристика электропривода приближенно выражается известной формулой:

$$M = \frac{2M_K}{s_a/s_{a, \text{кр}} + s_{a, \text{кр}}/s_a}, \quad (3-7)$$

где $M_K = \frac{3E_{1, \text{max}}^2}{2\omega_{0, \text{ном}}x_2'}$; $s_{a, \text{кр}} = R_2'/x_2'$.

Уравнению (3-7) соответствует механическая характеристика, показанная на рис. 3-5, б кривой 2. Рассматривая рис. 3-5, а, можно заключить, что реальная механическая характеристика при самовозбуждении при ненасыщенной машине достаточно близко совпадает с прямой 1, а в области насыщения сближается с кривой 2, причем наибольшие отклонения от этих кривых соответствуют значению $I_\mu = I_{\mu, \text{ном}}$, при котором $x_\mu = x_{\mu, \text{ном}}$, $E_1 = E_{1, \text{ном}} \approx U_{\phi, \text{ном}}$. Подставляя эти значения в (3-6) и (3-7), определяем точку $\omega_{\text{гр1}} = -s_{a, \text{гр1}}\omega_{0, \text{ном}}$ и $M_{\text{гр1}}$, через которую проходит реальная механическая характеристика в этой области:

$$\left. \begin{aligned} s_{a, \text{гр1}} &= \frac{\pm R_2'}{x_{\mu, \text{ном}} \sqrt{k_c^2 - (1 + x_2'/x_{\mu, \text{ном}})^2}}; \\ M_{\text{гр1}} &= \frac{3U_{\phi, \text{ном}}^2}{\omega_{0, \text{ном}}x_2' (s_{a, \text{гр1}}/s_{a, \text{кр}} + s_{a, \text{кр}}/s_{a, \text{гр1}})}. \end{aligned} \right\} \quad (3-8)$$

Таким образом, механическая характеристика асинхронного электропривода в рассматриваемой схеме самовозбуждения имеет форму, показанную на рис. 3-5, б кривой 3. Увеличение сопротивления роторной цепи R_2' в соответствии с (3-6) и (3-8) приводит к возрастанию $\omega_{\text{гр}}$ и $\omega_{\text{гр1}}$, и в выражениях (3-7) и (3-8) увеличивается критическое скольжение $s_{a, \text{кр}}$ (см. кривую 4 на рис. 3-5, б).

Рассматривая характеристики 3 и 4, можно убедиться, что в области $M \leq M_{\text{гр1}}$ механические характеристики при самовозбуждении имеют высокую жесткость и обеспечивают благоприятные условия для получения низких устойчивых скоростей спуска грузов. Использование этого режима взамен торможения противовключением дает существенную экономию электроэнергии, так как в рассмотренном варианте при спуске грузов с пониженной скоростью электропривод из сети энергию не потребляет. Выполненные расчеты показывают, что соотноше-

ния (3-6)–(3-8) позволяют построить механическую характеристику электропривода с достаточной точностью, если подставлять в них значения $x_{\mu, \max}$, $x_{\mu, \text{ном}}$ и $E_{1 \max}$, определяемые реальной характеристикой намагничивания двигателя. Для крановых двигателей с удовлетворительной точностью можно принимать $x_{\mu, \max} = 1,5 x_{\mu, \text{ном}}$ и $E_{1 \max} = 1,2 U_{\phi, \text{ном}}$ [7].

Соотношение (3-5) свидетельствует о том, что условия самовозбуждения зависят от сочетания параметров двигателей. Одни двигатели хорошо возбуждаются при $k_{\text{ш}} = 0,85 \div 0,92$, другие в рабочем диапазоне скоростей не самовозбуждаются даже при $k_{\text{ш}} = 1$. Поэтому обычно для получения требуемых характеристик в режиме тормозного спуска в схеме включения кроме цепи самовозбуждения предусматривается дополнительная цепь независимого возбуждения двигателя от сети переменного тока. Вариант такой цепи показан на рис. 3-3 пунктирными линиями (однополупериодная схема выпрямления). Если (3-5) удовлетворяется при $k_{\text{ш}} = 0,85 \div 0,92$, ток независимого возбуждения устанавливают в пределах 2–5% номинального тока двигателя $I_{\text{ном}}$ с целью повышения надежности самовозбуждения. Для двигателей с плохими условиями самовозбуждения предусматривается более мощная цепь независимого возбуждения, ток которого достигает 20–30% $I_{\text{ном}}$ [7].

Динамическое торможение двигателя с самовозбуждением является простым, экономичным и эффективным способом увеличения диапазона регулирования скорости при спуске грузов, поэтому его применение интенсивно расширяется.

Использование тиристорных регуляторов напряжения дает возможность регулировать скорость асинхронного электропривода не только при спуске, но и при подъеме грузов. Однако уменьшение напряжения на статоре двигателя влечет за собой снижение его магнитного потока, что при данном значении момента вызывает увеличение тока, потерь, выделяющихся в двигателе, и соответствующее ухудшение его условий работы в отношении нагрева. Тиристорный регулятор напряжения имеет габариты, соизмеримые с габаритами тиристорного преобразователя для питания двигателей постоянного тока, содержит аналогичную систему фазового управления и также вносит искажения в напряжение питающей сети. Если учесть отмеченное выше ухудшение условий работы двигателя и необходимость использования тахогенератора для поддержания постоянства скорости электропривода, можно заключить, что перспективы использования тиристорных регуляторов напряжения в крановых асинхронных электроприводах весьма ограничены. Их использование может представить интерес в тех редких слу-

чаях, когда регулирование скорости не требуется, а необходимо регулирование момента, развиваемого асинхронным электроприводом в переходных процессах пуска и торможения.

Наиболее благоприятные условия регулирования скорости асинхронного электропривода дают способы, позволяющие изменять синхронную скорость двигателя

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p_n, \quad (3-9)$$

где p_n — число пар полюсов двигателя.

В соответствии с (3-9) имеются две возможности изменения угловой скорости поля двигателя — изменение числа пар полюсов p_n и регулирование частоты тока статора. Первый способ широко используется за счет применения крановых многоскоростных короткозамкнутых двигателей, имеющих на статоре две или три обмотки с различным числом пар полюсов. Схема включения обмоток трехскоростного асинхронного двигателя грузоподъемной лебедки представлена на рис. 3-6, а. Эта схема применяется для электроприводов мощностью до 40 кВт и обеспечивает регулирование скорости в диапазоне 4:1 и 6:1 в зависимости от данных применяемого двигателя.

Особенностью схемы является переключение трех обмоток двигателя с помощью четырех контакторов ($KC1 - KC4$), имеющих по замыкающему и размыкающему контакту каждый. Для получения первой скорости подъема груза включаются контакторы KB и $KЛ$, которые и подключают обмотку первой скорости $1C1, 1C2, 1C3$ к сети через замкнутые размыкающие контакты $KC1$ и $KC2$. Переход на вторую скорость осуществляется путем включения контакторов $KC1$ и $KC2$; при этом их размыкающие контакты отключают цепь обмотки первой скорости, а замыкающие включают на сеть обмотку $2C1, 2C2, 2C3$. Включение обмотки третьей скорости $3C1, 3C2, 3C3$ осуществляется замыкающими контактами $KC1 - KC4$, которые одновременно своими размыкающими контактами предотвращают включение двух других обмоток двигателя.

Механические характеристики рассматриваемого электропривода лебедки при использовании двигателя с соотношением числа полюсов 24/8/4 показаны на рис. 3-6, б. Эти характеристики имеют высокую жесткость как в двигательном, так и в генераторном режиме. Схема управления симметрична, т. е. обеспечивает одинаковое семейство характеристик как при подъеме, так и при спуске грузов.

Возможность ступенчатого изменения скорости поля, как известно из курса теории электропривода [4], обеспечивает снижение потерь энергии, выделяющихся в двигателе в переходных процессах пуска и торможения. Поэтому в схемах

управления такими двигателями предусматривается автоматизированный в функции времени пуск в три ступени, генераторное торможение в две ступени и при необходимости реверс переключением фаз обмотки низкой скорости с последующим пуском до основной скорости в две ступени. Таким путем достигается увеличение допустимой частоты включений двигателя, однако следует иметь в виду, что размещение на двигателе трех обмоток приводит к относительному увеличению его габаритов и моментов инерции.

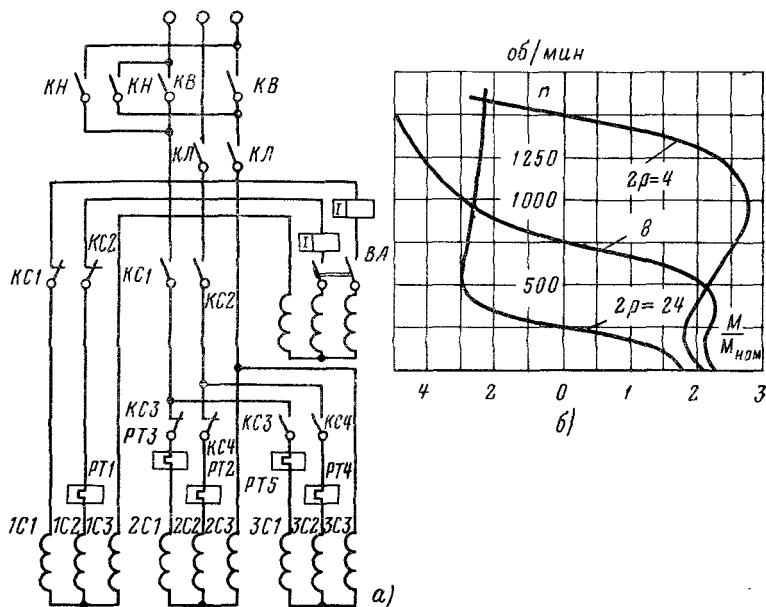


Рис. 3-6. Схема силовых цепей кранового электропривода с трех-скоростным двигателем (а) и соответствующие механические характеристики (б).

Наиболее высокая управляемость кранового электропривода при использовании простого и надежного асинхронного короткозамкнутого двигателя обеспечивается регулированием частоты тока статора. Имеются разработки электроприводов подъемных лебедок по системе управляемый инвертор тока — двигатель [9], свидетельствующие о больших возможностях формирования требуемых для кранов статических и динамических качеств привода в такой системе. Однако подобные системы пока не вышли из стадии опытно-промышленных разра-

боток и их применение ограничивается высокой стоимостью, большими габаритами и сложностью преобразователя. Поэтому в настоящее время для наиболее тяжелых режимов работы при высоких требованиях к регулированию скорости в отечественной и зарубежной практике находят широкое применение двигатели постоянного тока.

В наиболее тяжелых условиях работы, в частности в металлургическом производстве, широко используются краны, получающие питание от сети постоянного тока. Электропривод ме-

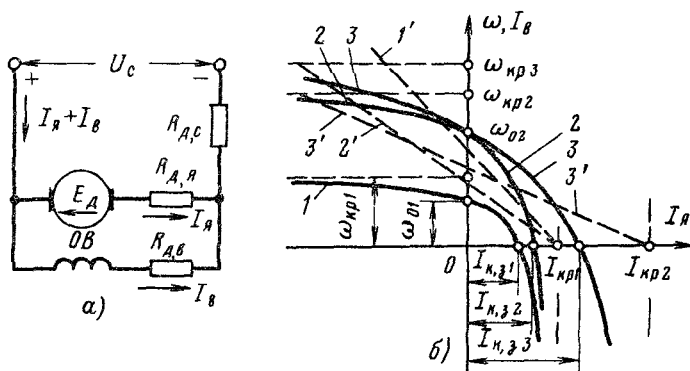


Рис. 3-7. Схема безопасного спуска (а) и соответствующие характеристики двигателя при различных значениях параметров (б).

1 и 1' — $R_{я\Sigma}$, $R_{в\Sigma 1}$, $R_{д,с1}$; 2 и 2' — $R_{я\Sigma}$, $R_{в\Sigma 2} > R_{в\Sigma 1}$ и $R_{д,с1}$; 3 и 3' — $R_{я\Sigma}$, $R_{в\Sigma 1}$ и $R_{д,с2} < R_{д,с1}$.

ханизмов этих кранов осуществляется от двигателей постоянного тока независимого, смешанного или последовательного возбуждения с реостатным управлением. Выбор способа возбуждения двигателей определяется характером нагрузок и пределами их изменения (см. § 2-1).

Для подъемных лебедок при работе на подъем наиболее благоприятной характеристикой обладает двигатель с последовательным возбуждением. Его характеристика обеспечивает значительное увеличение скорости при подъеме легких грузов, за счет чего повышается производительность механизма. Кроме того, преимуществом такого двигателя является более высокая перегрузочная способность.

Для механизмов передвижения кранов, работающих в закрытом помещении, нагрузки которых обусловлены только реактивными силами трения, также успешно применяется двигатель с последовательным возбуждением. В остальных случаях,

когда под действием уклона или ветра возможно возникновение движущих нагрузок, применяются двигатели с более жесткой характеристикой смешанного или независимого возбуждения.

Для расширения пределов регулирования скорости двигателей постоянного тока используется схема шунтирования якоря [4]. В электроприводах подъемных лебедок с двигателями последовательного возбуждения регулирование скорости при спуске грузов осуществляется с помощью специальной схемы, которая получила название схемы безопасного спуска.

В этой схеме, представленной на рис. 3-7, а, обмотка возбуждения двигателя через сопротивление $R_{дв}$ включается параллельно якорю двигателя. К сети эти параллельные цепи подключаются через общее добавочное сопротивление $R_{д,с}$, а в якорную цепь двигателя вводится добавочное сопротивление $R_{д,я}$. В соответствии со схемой можно записать следующие уравнения, которыми определяются статические характеристики:

$$\left. \begin{aligned} U_c &= E_{дв} + I_{я}R_{я,\Sigma} + (I_{в} + I_{я}) R_{д,с}; \\ E_{дв} + I_{я}R_{я,\Sigma} &= I_{в}R_{в,\Sigma}, \end{aligned} \right\} \quad (3-10)$$

где $E_{дв} = k\Phi\omega$; $R_{я,\Sigma} = R_{я} + R_{д,я}$; $R_{в,\Sigma} = R_{в} + R_{д,в}$.

Механические характеристики в схеме безопасного спуска существенно нелинейны вследствие нелинейной связи между потоком Φ и током возбуждения $I_{в}$. Однако в пределах ненасыщенной части характеристики намагничивания двигателя можно, пренебрегая гистерезисом, положить $\Phi = k_{\Phi}I_{в}$. При этом могут быть получены аналитические зависимости, позволяющие выявить форму электромеханических характеристик двигателя $\omega = f(I_{я})$ и других зависимостей, характеризующих работу схемы. Из (3-10) определяется ток возбуждения двигателя:

$$I_{в} = \frac{U_c - I_{я}R_{д,с}}{R_{в,\Sigma} + R_{д,с}}. \quad (3-11)$$

Подставляя (3-11) в (3-10) и принимая $\Phi = k_{\Phi}I_{в}$, после преобразований получаем уравнение электромеханической характеристики:

$$\omega = \frac{U_c R_{в,\Sigma} - I_{я} (R_{в,\Sigma} R_{д,с} + R_{в,\Sigma} R_{я,\Sigma} + R_{я,\Sigma} R_{д,с})}{kk_{\Phi} U_c - kk_{\Phi} R_{д,с} I_{я}}. \quad (3-12)$$

Знаменатель (3-12) при $I_{я} \rightarrow I_{кр} = U_c / R_{д,с}$ стремится к 0, при этом скорость, неограниченно увеличиваясь, стремится к $-\infty$.

Следовательно, прямая $I_{\text{я}} = I_{\text{кр}}$ является асимптотой для электромеханической характеристики. Физически наличие асимптоты объясняется тем, что в режиме противовключения ЭДС двигателя меняет знак и начинает компенсировать падение напряжения на сопротивлениях $R_{\text{я},\Sigma} = R_{\text{я}} + R_{\text{д.я}}$. При этом напряжение цепи возбуждения стремится к нулю. В пределе при $I_{\text{я}} = I_{\text{кр}} = U_{\text{с}}/R_{\text{д.с}}$ ток возбуждения равен нулю, как это следует из (3-11).

Скорость идеального холостого хода может быть получена из (3-12) путем подстановки $I_{\text{я}} = 0$:

$$\omega_0 = R_{\text{в},\Sigma}/kk_{\Phi}. \quad (3-13)$$

Вторая асимптота имеет место при неограниченном возрастании тока якоря в области генераторного режима. Из (3-12) при $I_{\text{я}} \rightarrow (-\infty)$ получим:

$$\omega_{\text{кр}} = \frac{R_{\text{в},\Sigma}}{kk_{\Phi}} \left(1 + \frac{R_{\text{я},\Sigma}}{R_{\text{д.с}}} + \frac{R_{\text{я},\Sigma}}{R_{\text{в},\Sigma}} \right) = \omega_0 \left(1 + \frac{R_{\text{я},\Sigma}}{R_{\text{д.с}}} + \frac{R_{\text{я},\Sigma}}{R_{\text{в},\Sigma}} \right). \quad (3-14)$$

Полученные соотношения позволяют выявить форму электромеханических характеристик, ряд которых для различных значений параметров представлен на рис. 3-7, б. Характеристика 1 соответствует параметрам $R_{\text{я},\Sigma}$, $R_{\text{в},\Sigma 1}$ и $R_{\text{д.с} 1}$, которые определяют значения $I_{\text{кр}} = I_{\text{кр} 1}$, $\omega_0 = \omega_{0 1}$ и $\omega_{\text{кр}} = \omega_{\text{кр} 1}$. При $R_{\text{в},\Sigma} = R_{\text{в},\Sigma 2} > R_{\text{в},\Sigma 1}$ в соответствии с (3-13) увеличивается скорость идеального холостого хода до $\omega_0 = \omega_{0 2}$ и несколько возрастает ток короткого замыкания до $I_{\text{к.з}} = I_{\text{к.з} 2}$ (характеристика 2). Уменьшение общего добавочного сопротивления до $R_{\text{д.с}} = R_{\text{д.с} 2}$ оставляет неизменной скорость холостого хода, но увеличивает ток асимптоты до $I_{\text{кр}} = I_{\text{кр} 2}$, и, следовательно, возрастает ток короткого замыкания до $I_{\text{к.з}} = I_{\text{к.з} 3}$ (характеристика 3).

Из рассмотрения полученных характеристик можно заключить, что в области генераторного режима при $\omega > \omega_0$ характеристики имеют высокую жесткость, а в двигательном режиме их форма обеспечивает благоприятные условия ограничения пускового тока и момента электропривода. Важной особенностью схемы является увеличение тока возбуждения двигателя $I_{\text{в}}$ по мере возрастания нагрузки в генераторном режиме (зависимости $I_{\text{в}} = f(I_{\text{я}}) 1', 2' \text{ и } 3'$ на рис. 3-7, б, соответствующие характеристикам 1, 2, 3). Поэтому данная схема используется в режиме спуска грузов; для этого обмотка возбуждения двигателя *ОВ* переключается на противоположное направление про-

текания тока. Соответственно на рис. 3-7, б знаки скоростей и токов меняются на противоположные: область двигательного режима располагается в третьем, а генераторного в четвертом квадрантах. С увеличением движущей нагрузки на валу при $|\omega| > |\omega_0|$ возрастание скорости спуска грузов сопровождается ростом тока возбуждения и потока двигателя. Это увеличивает жесткость характеристик и повышает надежность торможения опускающего груза, благодаря чему схема и получила свое название.

Полученные соотношения не учитывают насыщения и потому достаточно близко соответствуют действительности только при $\omega \leq \omega_0$, где двигатель не насыщен. При $\omega > \omega_0$ начинает сказываться насыщение, поэтому для реальной схемы асимптоты (3-14) не существует. Однако полученная форма характеристик в рабочей области хорошо согласуется с формой реальных характеристик, полученных опытным путем.

Форма механических характеристик в схеме безопасного спуска определяется приведенными на рис. 3-7, б зависимостями в соответствии с соотношением

$$M = k\Phi(I_B)I_{\Delta}.$$

Использование схем шунтирования якоря и безопасного спуска обеспечивает диапазон регулирования скорости $D = 5 \div 7$, который удовлетворяет требованиям во многих практических случаях.

В наиболее ответственных случаях при высоких требованиях к плавности переходных процессов и в отношении регулирования скорости (мощные перегружательные, специальные монтажные краны и т. п.) применяется система Г — Д. При этом для повышения производительности при малых грузах используется ослабление поля двигателя. В настоящее время ведутся работы по использованию на кранах системы ТП — Д.

Электроснабжение большинства кранов осуществляется напряжением 380 В переменного тока или 220 В постоянного тока от электрических сетей промышленных предприятий. Наряду с этим крановое электрооборудование может изготавливаться и на другие напряжения, но не выше 440 и 500 В соответственно постоянного и переменного тока. В перспективе для крупных кранов намечается использование переменного напряжения 660 В.

Питание электрооборудования поступательно перемещающихся кранов производится обычно по проложенным на изоляторах вдоль подкрановых путей жестким контактным проводам — троллеям, выполняемым из стального проката: полосы,

уголка, швеллера и т. п. От контактных проводов с помощью скользящих токоъемников напряжение подводится к защитной панели (см. § 3-2). Для питания токоприемников, расположенных на тележках мостовых кранов, используются вспомогательные контактные провода, укрепленные вдоль фермы моста. Для маломощных подъемных установок (кран-балки, электротали, стреловые краны и т. п.), а также в случаях, когда наличие контактного токопровода недопустимо (например, во взрывоопасных помещениях), применяется токоподвод гибким шланговым кабелем. С помощью гибкого кабеля осуществляется также питание многих подвижных подъемно-транспортных машин, работающих на открытом воздухе (например, башенных строительных кранов). Для передачи электроэнергии с опорной части на подвижную платформу полноворотных кранов используются так называемые кольцевые токоприемники. Несколько (по числу фаз подводимого напряжения) стальных или латунных колец располагается друг под другом по оси вращения платформы и крепятся к ней на изоляторах. С каждым из колец соприкасается чугунная или бронзовая щетка, механически связанная с неподвижной опорной частью с помощью изоляторов. При этом напряжение подводится к неподвижным щеткам и через скользящий контакт щетка — токоъемное кольцо поступает к электроприемникам поворотной платформы.

В соответствии с правилами техники безопасности все электроприводы крана должны быть оборудованы механическими тормозами, срабатывающими при исчезновении напряжения (нормально замкнутого типа). Кроме того, правила регламентируют специальные блокировки и защитные устройства, необходимые для безопасной эксплуатации кранов, которые отражены в рассматриваемых ниже примерах схем.

3-2. КОНТРОЛЛЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КРАНОВЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Силовой контроллер представляет собой аппарат для ручного управления электродвигателем. Силовые контакты контроллера рассчитаны на переключение силовых цепей двигателя и замыкаются или размыкаются в последовательности, определяемой диаграммой замыкания контактов в зависимости от положения его вала. Промышленностью выпускаются крановые кулачковые контроллеры постоянного тока типа КВ100 и переменного тока типа ККТ60А.

Правила безопасности предъявляют ко всем схемам управления крановыми электроприводами ряд обязательных требований: автоматическое ограничение хода механизмов; блокировки, предотвращающие столкновение двух тележек или двух кранов, работающих на одних путях; блокировки, автоматически отключающие напряжение при открывании люка для выхода на мост крана (как исключение, при этом может оставаться напряжение только на цепях питания подъемного магнита) и ряд других. Для осуществления этих автоматических защит и блокировок схема ручного управления с помощью контроллера должна содержать аппарат автоматического действия. Таким аппаратом является контактор защитной панели, которая является важным элементом схем контроллерного управления.

Крановая защитная панель содержит общий рубильник питания крана, линейный контактор, комплект максимальных реле, а также кнопку и пакетный выключатель для включения и отключения цепей управления. Для кранов переменного тока выпускаются панели типа ПЗКБ, а для кранов постоянного тока — панели типа ППЗБ.

Защитные панели комплектуются электромагнитными реле максимального тока в конструктивном исполнении, позволяющем реализовать различные по числу двигателей и схемам включения катушек реле варианты защиты. С этой целью на защитной панели устанавливаются основания, позволяющие закрепить от двух до четырех сменных электромагнитов, якорь которых воздействуют на общую скобу, размыкающую установленный на панели общий для этих реле вспомогательный контакт, отключающий цепь катушки контактора защитной панели. Конструкция обеспечивает установку до восьми электромагнитов реле и возможность соединения их катушек по различным схемам.

Схема защитной панели типа ПЗКБ для нормального кранового мостового крана с приводом переменного тока представлена на рис. 3-8. Включение контактора защитной панели *Л* осуществляется нажатием кнопки *КВ*. При этом ее контакты замыкаются, и на катушку *Л* подается напряжение, если замкнуты контакты: максимальной защиты *РМ*, аварийного выключателя *АВ*, блокировки люка хода из кабины на мост крана *КБЛ* и нулевые вспомогательные контакты контроллеров подъема *КП*, передвижения тележки *КТ* и моста *КМ*. Благодаря этому контактор *Л* может включиться только в том случае, если все контроллеры установлены в нулевое положение. Этим исключается самозапуск двигателей, представляющий опасность для людей. Контактор *Л*, срабатывая, становит-

ся на самопитание через цепочку, составленную из вспомогательных контактов контроллеров и конечных выключателей каждого механизма, которые соединены таким образом, что при срабатывании одного из конечных выключателей запрещается дальнейшая работа привода в данном направлении, но обеспечивается возможность движения в противоположном направлении. Так, при выходе из зоны нормальной работы моста

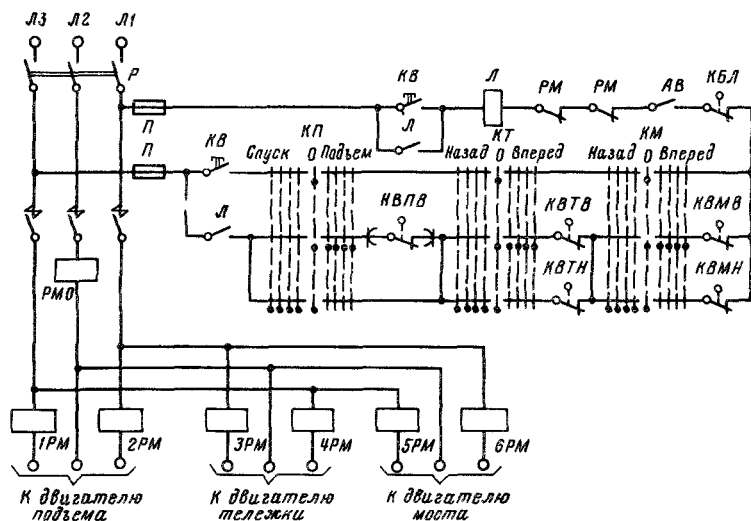


Рис. 3-8. Схема крановой защитной панели переменного тока.

крана в случае движения «Вперед» срабатывает конечный выключатель *КВМВ* и отключает контактор *Л*. При этом теряют питание все двигатели, происходит затормаживание механизмов механическими тормозами. После установки всех контроллеров в нулевое положение нажатием кнопки *КВ* контактор *Л* включается вновь. Так как конечный выключатель *КВМВ* разомкнут, цепь питания *Л* сохраняется только в положениях «Назад» контроллера *КМ* через замкнутый контакт выключателя *КВМН*.

На рис. 3-8 показана также схема силовых цепей защитной панели. Здесь можно видеть, что в две фазы каждого двигателя включены катушки максимальных реле *1РМ* — *6РМ*, а общая третья фаза защищается реле *РМ0*.

На рис. 3-9 показана схема управления крановым асинхронным двигателем с помощью контроллера типа *ККТ61А*.

Включение, отключение и изменение направления вращения двигателя осуществляется с помощью силовых контактов контроллера $K2, K4, K6$ и $K8$. При подаче на статор двигателя напряжения одновременно включается электромагнит тормоза $ТМ$, тормозные колодки которого освобождают тормозной шкив. Переключение сопротивлений в роторной цепи, необходимое для пуска двигателя и регулирования скорости, производится

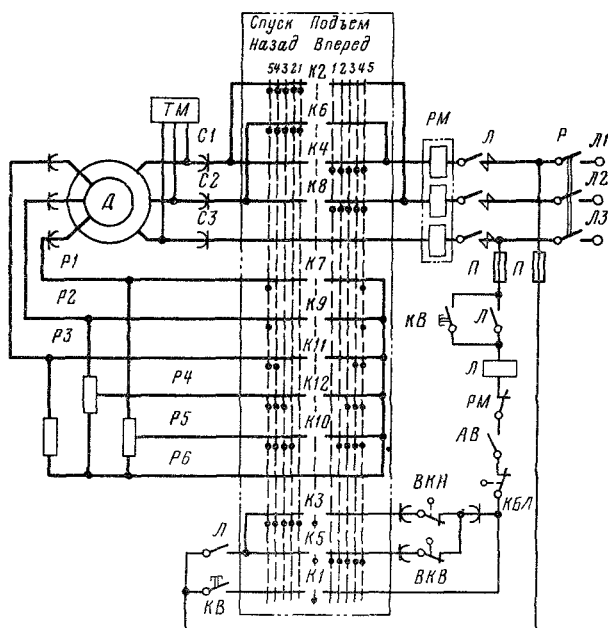


Рис. 3-9. Схема управления крановым асинхронным электроприводом с помощью силового контроллера.

дится контактами $K7, K9 - K12$. Эти переключения производятся поочередно в разных фазах ротора. Возникающая при этом несимметрия ротора невелика и не оказывает существенного влияния на форму реостатных механических характеристик, а количество регулировочных ступеней при данном числе контактов получается наибольшим. Для симметричного переключения сопротивлений в роторной цепи при тех же четырех регулировочных позициях контроллера требуются три дополнительных силовых контакта и соответственно увеличенные габариты контроллера.

Вспомогательные контакты контроллера $K1$, $K3$ и $K5$ используются в схеме защитной панели, аналогично рассмотренной на рис. 3-8.

Механические характеристики электропривода, соответствующие различным положениям контроллера, представлены на рис. 3-10. Для механизмов передвижения они обеспечивают реостатное регулирование скорости в небольшом диапазоне и ограничение токов и моментов электропривода при пуске, которое осуществляет оператор, постепенно переставляя контрол-

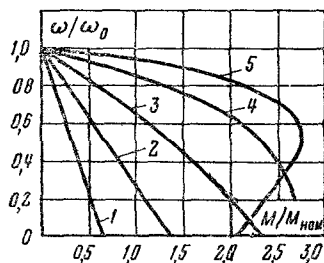


Рис. 3-10. Механические характеристики электропривода с силовым контроллером типа ККТ61А.

лер из положения 0 в положение 5 с допустимым темпом. Регулировочные возможности для механизмов подъема ограничены. При спуске грузов получить среднюю пониженную скорость спуска оператор может только периодическим наложением механического тормоза путем установки контроллера в нулевое положение.

В последние годы промышленность освоила выпуск электроприводов с контроллерным управлением с существенно лучшими регулировочными возможностями за счет введения при спуске грузов режима динамического торможения с самовозбуждением. В качестве такого примера на рис. 3-11 представлена схема кулачкового контроллера типа ККТ65А. Строго говоря, это схема комплектного кранового электропривода, система управления которым содержит силовой контроллер, релейно-контакторную панель управления режимом динамического торможения и защитную панель типа ПЗКБ.

При подъеме грузов работа схемы не имеет принципиальных отличий от рассмотренной выше. В первых четырех положениях при спуске грузов включен контактор динамического торможения $KД$, а контактор двигательного режима $KСП$ выключен; переключением их контактов собирается рассмотренная выше схема динамического торможения с самовозбуждением (см. рис. 3-3). Данный контроллер предназначен для двигателей с благоприятными условиями самовозбуждения, поэтому независимая составляющая тока статора не превышает

5% номинального тока и обеспечивается однополупериодным выпрямлением по цепи: клемма Л1, контакты Р и КЛ, обмотки РМ и статора двигателя С1, С2, контакт КД (С2—20), размыкающий контакт КСП, резистор R1, диод Д1, катушка реле контроля наличия тока независимого возбуждения РКТ, контакт КЛ, предохранитель П, контакт Р и клемма Л3. Механические характеристики, представленные на рис. 3-12, свидетельствуют о том, что использование режима динамического торможения обеспечивает устойчивые пониженные скорости

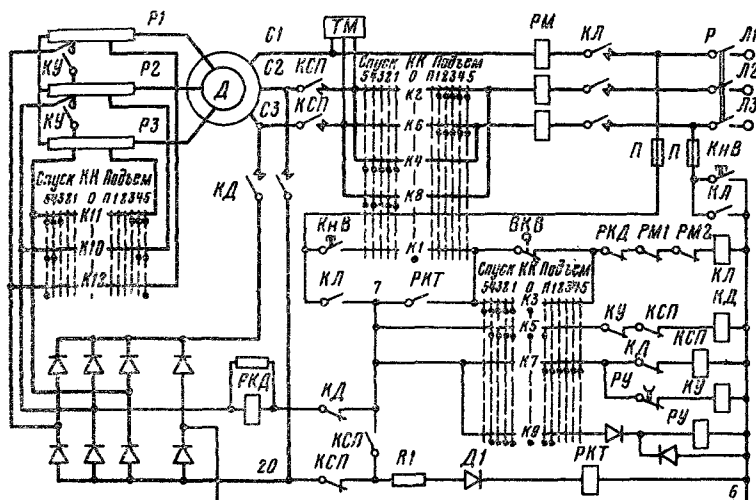


Рис. 3-11. Схема кранового асинхронного электропривода с силовым контроллером типа ККТ65А.

спуска грузов, чем существенно облегчается управление механизмом. Возможность регулирования скорости спуска при $D = 5$ и минимальное потребление энергии на регулировочных ступенях спуска выгодно отличают данную схему от схемы контроллера типа ККТ61А.

Особенностью контроллера типа ККТ65А является наличие промежуточного положения П, в котором одновременно замкнуты его контакты К5 и К7. Перекрытие этих контактов исключает одновременное отключение контакторов КСП и КД при перестановках контроллера, чем повышается надежность работы привода. Одновременное включение этих контакторов при этом предотвращается электрической (размыкающие кон-

такты КСП и КД в цепях катушек КД и КСП) и механической блокировками.

Наличие релейно-контакторной панели позволило автоматизировать процессы пуска электропривода. При быстрой перестановке контроллера из нулевого положения в крайнее положение «подъем» или «спуск» в течение выдержки времени реле РУ пуск происходит при введенной пусковой ступени сопротивления (характеристика А на рис. 3-12), которая при отпадании реле РУ замыкается накоротко контактами контактора КУ.

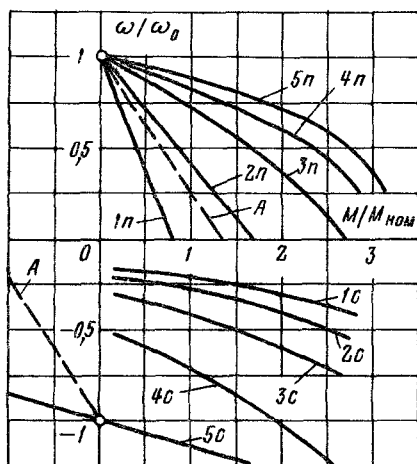


Рис. 3-12. Механические характеристики электропривода с контроллером типа ККТ65А.

Показанные на схеме контактор КЛ, кнопка КнВ и цепи защиты и блокировок относятся к защитной панели типа ПЗКБ, которая входит в комплект электропривода. Релейно-контакторная панель управления динамическим торможением типа ТРД160 содержит следующие аппараты: контакторы КД, КСП, КУ, реле РУ, РКТ и РКД. Реле РКД контролирует исправность силовых диодов выпрямительного моста.

3-3. КРАНОВЫЕ МАГНИТНЫЕ КОНТРОЛЛЕРЫ

При интенсивном режиме работы и значительной мощности привода от ручного управления с помощью силовых контроллеров, несмотря на его очевидную простоту, приходится отказываться. Отсутствие автоматического контроля за процессами пуска и торможения затрудняет получение минимальной длительности переходных процессов, а управление тяжелым контроллером требует от оператора значительных

Таблица 3-1

Назначение панели	Электропривод постоянного тока	Асинхронный электропривод с аппаратами управления	
		переменного тока	постоянного тока
Управление электроприводом механизмов передвижения и поворота	П	ТА, ТА3	К
То же для двухдвигательного привода	ДП	ДТА	ДК
Управление электроприводом механизмов подъема	ПС	ТСА, ТСА3	КС
То же для двухдвигательного привода	ДПС	ДТСА	ДКС

усилий. Кроме того, коммутационная способность контроллеров ограничена, и с увеличением частоты включений и мощности привода возникает необходимость замены контроллеров более совершенными коммутирующими аппаратами.

На первом этапе развития крановых электроприводов задача решалась заменой силовых контактов контроллера силовыми контактами контакторов, включение и отключение которых в требуемой последовательности производилось с помощью контактов командоконтроллера без какой-либо автоматизации. Схемы контроллерного управления при этом принципиально не изменялись, поэтому подобные устройства получили название крановых магнитных контроллеров. В дальнейшем было учтено, что введение в схему контакторов в значительной степени расширяет возможности схем в отношении реализации различных автоматических блокировок, получения специальных регулировочных характеристик, автоматизации пуска и торможения. Поэтому большинство выпускаемых в настоящее время крановых магнитных контроллеров представляет собой типовые панели автоматического управления крановыми электроприводами. Представление об основных типах выпускаемых заводами магнитных контроллеров дает табл. 3-1.

Панели управления, предназначенные для механизмов передвижения и поворота, в соответствии с характером нагрузок этих электроприводов имеют симметричные схемы, обеспечивающие автоматизированные пуск и торможение и реостатное регулирование скорости. Эти схемы не имеют существенных отличий от типовых схем управления двигателями постоянного и переменного тока, рассматриваемых в курсе «Автоматическое управление электроприводами». Специфика крановых магнитных контроллеров проявляется в значительно большей

степени в панелях, предназначенных для управления электроприводами механизмов подъема. В соответствии с активным характером нагрузки этих электроприводов их схемы управления выполняются несимметричными, т. е. одним и тем же положениям командоконтроллера при подъеме и при спуске соответствуют различные схемы включения двигателя.

Панели типов ТА, ДТА, ТСА и ДТСА элементов защиты и блокировок не содержат; аналогично силовым контроллерам

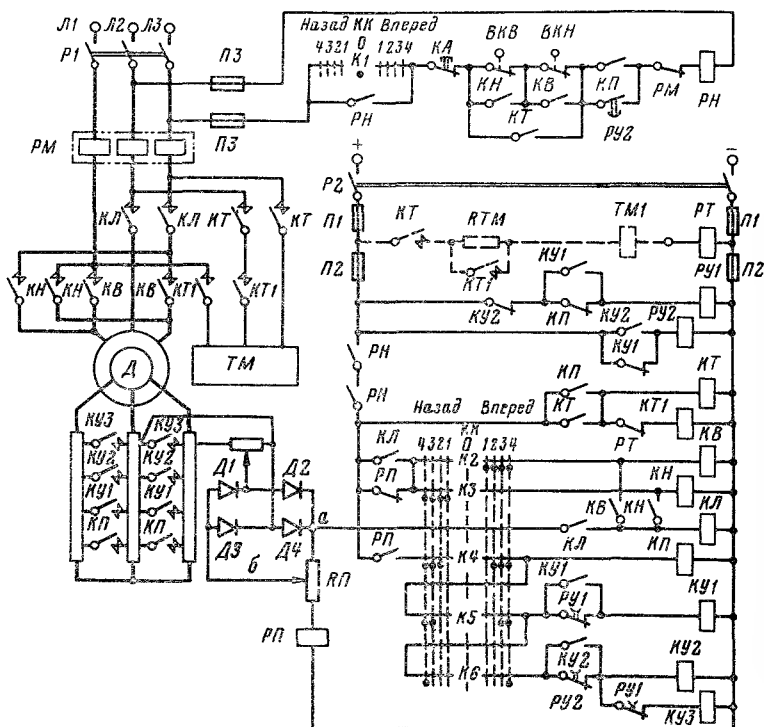


Рис. 3-13. Схема кранового магнитного контроллера типа К.

они используются в комплекте с защитными панелями типа ПЗКБ. Остальные магнитные контроллеры имеют полную схему управления, защиты и блокировок и применения защитных панелей не требуют.

Достаточные представления о крановых электроприводах переменного и постоянного тока массового применения можно получить, рассмотрев в качестве характерных примеров схемы

магнитных контроллеров типов К, ТСА и ПС. Типовая схема магнитного контроллера типа К, предназначенного для управления механизмами передвижения, приведена на рис. 3-13. Рассматривая силовую часть схемы, можно установить, что напряжение к обмотке статора подводится через контакты рубильника *Р1*, линейного контактора *КЛ* и контакты контакторов *КВ* и *КН*, задающих направление движения. Последовательно в эту цепь включены катушки реле максимального тока *РМ*, а параллельно обмотке статора через контакты контакторов *КТ* и *КП* подключается трехфазный электромагнит механического тормоза *ТМ*. В роторную цепь двигателя включены пять ступеней пускорегулировочного сопротивления, четыре из которых могут быть замкнуты контактами контакторов *КП*, *КУ1*, *КУ2* и *КУ3*, а пятая ступень представляет собой невыключаемое добавочное сопротивление.

Цепи защиты и блокировок выполнены на переменном токе с помощью реле *РН*; здесь можно видеть нулевую блокировку (нулевой контакт командоконтроллера *К1*, шунтированный контактом *РН*), конечную защиту (контакты конечных выключателей *ВКВ* и *ВКН*, шунтированные контактами контакторов соответственно *КН*, *КВ* и размыкающим контактом *КТ*), максимальную защиту (контакт *РМ*). Панель предназначена для кранов с тяжелым режимом работы, поэтому схема управления выполнена на постоянном токе. Использование контакторов постоянного тока при этом обеспечивает более высокую надежность и долговечность работы электрооборудования. Питание цепей управления осуществляется от источника постоянного тока через предохранители *П1* и *П2*, для контроля исправности которых в цепь реле *РН* введены замыкающие контакты *КП* и *РУ2*.

Ступенчатое реостатное регулирование скорости и момента электропривода осуществляется с помощью контактов *К2* — *К6* командоконтроллера *КК*, причем контакты *К2* и *К3* служат для задания направления движения, а остальные имеют симметричную диаграмму замыкания и используются для включения и отключения ступеней пускорегулировочного сопротивления с помощью контакторов *КП*, *КУ1*, *КУ2* и *КУ3*. Механические характеристики, соответствующие положениям командоконтроллера при движении вперед, показаны на рис. 3-14. Такое же семейство характеристик обеспечивается и при работе в противоположном направлении. Как показано на рисунке, при характерных для механизмов передвижения пределах изменения нагрузки диапазон регулирования скорости $D = 2 \div 2,5$.

Схемой предусматривается автоматическое управление процессами реостатного пуска электропривода и его торможения противовключением. При этом приняты меры для обеспечения удовлетворительной плавности протекания переходных процессов и ограничения динамических нагрузок передач при выборе зазоров: 1) выбор ступеней добавочного сопротивления в цепи ротора и выдержек времени реле ускорения $PY1$ и $PY2$ произведен с учетом рассмотренных в гл. 2 условий выбора зазоров; 2) в нулевом положении командоконтроллера предусмотрен свободный выбег электропривода без наложения механического тормоза. Рассмотрим эти важные особенности схемы.

При быстрой перестановке командоконтроллера из положения 0 в положение 4 «Вперед» включаются контакторы KB и $KЛ$ и к статорной обмотке двигателя подводится напряжение сети. Вспомогательный замыкающий контакт контактора $KЛ$ подключает через резистор RP катушку реле противовключения RP к питающему схему управления напряжению U_y . К точкам a и b резистора RP подключен диодный мост $D1-D4$, питающийся от напряжения роторной цепи. Благодаря этому между точками a и b создается пропорциональное ЭДС ротора E_2 падение напряжения U_{ab} , направленное встречно по отношению к U_y . При этом напряжение U_{RP} , прикладываемое к цепи катушки RP ,

$$U_{RP} = U_y - U_{ab} = U_y - kE_{2ном}s, \quad (3-15)$$

где $E_{2ном}$ — э.д.с. ротора при $s = 1$ и $U_1 = U_{1ном}$;
 s — скольжение.

Коэффициент k устанавливается таким, что при пуске ($s_{нач} = 1$) напряжение U_{RP} достаточно для включения реле RP .

Включаясь, реле RP замыкающим контактом через контакт командоконтроллера $K4$ подает напряжение на катушку $KП$, который своими главными контактами выводит первую ступень сопротивления в цепи ротора, а вспомогательными включает контакторы $КТ$ и $КТ1$ электро-

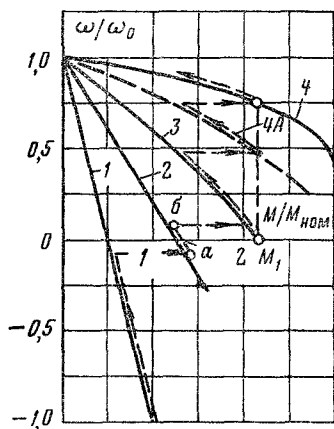


Рис. 3-14. Механические характеристики двигателя, управляемого панелью типа КС.

магнита тормоза и отключает катушку реле $PY1$. Реле времени $PY1$ отсчитывает выдержку времени, в течение которой электропривод ускоряется под действием момента, определяемого характеристикой 2 на рис. 3-14. По истечении выдержки времени реле $PY1$ его контакт в цепи катушки $KY1$ замыкается. Контакт $KY1$ включается, выводит вторую ступень роторного добавочного сопротивления, становится на самопитание, включает реле $PY1$ и размыкает цепь катушки реле $PY2$.

В течение выдержки времени реле $PY2$ электропривод ускоряется, работая на характеристике 3 (рис. 3-14), затем включается контактор $KY2$, выводит третью ступень сопротивления и размыкает цепь катушки реле $PY1$. Реле $PY1$ вновь отсчитывает выдержку времени, в течение которой происходит пуск с промежуточной пусковой характеристикой 4А. Далее включением контактора $KY3$ электропривод выводится на основную характеристику 4. В роторной цепи при этом остается невыключаемая ступень сопротивления, обеспечивающая требуемые условия ограничения тока и момента при данном числе контакторов ускорения.

Пусковая диаграмма на рис. 3-14 показывает, что характеристика 2 обеспечивает пониженный пусковой момент, требуемый для плавного выбора зазоров, который осуществляется в течение выдержки времени реле $PY1$. Затем происходит пуск электропривода с максимальным пусковым моментом M_1 в две ступени под контролем реле $PY2$ и $PY1$. Таким образом, реле $PY1$ используется при пуске дважды; его выдержка времени выбирается равной времени разгона на промежуточной характеристике 4А, поэтому она меньше, чем выдержка времени реле $PY2$. Этой выдержки времени достаточно и для выбора зазоров, так как после выбора зазоров существенного увеличения скорости на этой ступени не требуется (отрезок ab на характеристике 2 рис. 3-14).

Включившийся в начале пуска электромагнит тормоза TM при дальнейшей работе остается постоянно включенным, так как контактор KT становится на самопитание. Поэтому при установке командоконтроллера в нулевое положение механический тормоз не накладывается и снижение скорости происходит в режиме выбега под действием тормозного момента нагрузки. Отказ от использования механического тормоза для оперативного торможения устраняет рывки, обусловленные его наложением, и повышает плавность торможения. При этом тормоз накладывается только при срабатывании предусмотренных защит или при нажатии аварийной кнопки $КА$.

Для увеличения интенсивности торможения оператор имеет возможность использовать торможение противовключением путем перестановки командоконтроллера, например, из крайнего положения «Вперед» в крайнее положение «Назад». Контакт *КВ* и *КП* при этом отключаются, а контактор *КН* включается и переводит двигатель в режим противовключения с полностью включенным сопротивлением в цепи ротора (характеристика 1 на рис. 3-14). Так как в начале торможения $s_{нач} = 2$, в соответствии с формулой (3-15) напряжение на катушке реле *РП* недостаточно для его включения до тех пор, пока скорость не станет близкой к нулю. Реле *РП* включается при $s \leq 1,3$; если при этом контроллер не переставить в нулевое положение, произойдет пуск в обратном направлении аналогично рассмотренному выше.

Следует отметить, что рассмотренный магнитный контроллер при необходимости комплектуется тормозным электромагнитом постоянного тока. В этих случаях трехфазный тормозной электромагнит *ТМ* из схемы исключается и последовательно с реле *РТ* включается катушка *ТМ1* постоянного тока (показано на рис. 3-13 пунктиром). Форсировка процесса нарастания тока электромагнита *ТМ1* при его включении обеспечивается шунтированием добавочного сопротивления *RTM* замыкающим контактом *КТ1*. При токе, равном номинальному, срабатывает реле *РТ* и разрывает цепь катушки *КТ1*, контакт которого, размыкаясь, вводит последовательно с обмоткой *ТМ1* добавочное сопротивление *RTM*.

Характерные особенности схем управления крановыми электроприводами механизмов подъема с асинхронными двигателями с фазным ротором можно установить, рассматривая представленную на рис. 3-15 схему магнитного контроллера типа ТСА. К числу таких особенностей относятся: несимметричная относительно нулевого положения диаграмма замыкания контактов командоконтроллера, обеспечивающая при подъеме и спуске грузов различные механические характеристики электропривода в соответствии с несимметричным характером нагрузок подъемных лебедок; использование режима однофазного включения двигателя для улучшения условий регулирования скорости при спуске; отсутствие на панели аппаратов защиты и блокировок безопасности.

Необходимые защиты и блокировки осуществляются с помощью защитной панели типа ПЗКБ, общей для всех электроприводов крана. Показанный на схеме нулевой контакт *К1* командоконтроллера *КК* используется в схеме защитной панели для нулевой блокировки, а контакты *К2* и *К8* обеспечивают из-

бирательное действие конечных выключателей *ВКВ* и *ВКН*, ограничивающих ход механизма. В отличие от схем контроллера управления конечная защита здесь воздействует не на цепь катушки контактора защитной панели, а непосредственно снимает напряжение с цепей управления данного магнитного контроллера. Например, при недопустимом подъеме грузозахватывающего устройства контакт конечного выключателя *ВКВ* размыкается и отключает все цепи управления двигателем

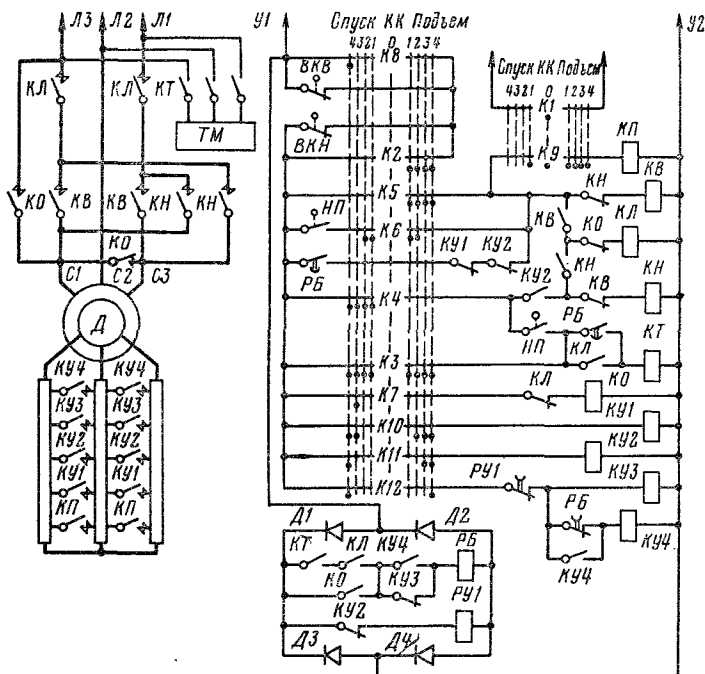


Рис. 3-15. Схема кранового магнитного контроллера типа ТСА.

подъема. Вновь напряжение может быть подано только при установке командоконтроллера в положение 4 (Спуск). В этом положении контакт *К8* шунтирует разомкнутый контакт выключателя *ВКВ*. Заметим, что ограничение движения в направлении спуск не является обязательным и контакт *ВКН* может отсутствовать. При этом контакт *К2* замыкается перемычкой.

В положении 0 командоконтроллера получает питание диодный мост *Д1* — *Д4* и реле *РУ1* включено, так как его катушка через размыкающий контакт *КУ2* обтекает выпрям-

ленным током. Остальные аппараты схемы при этом отключены. При установке командоконтроллера в положение 1 (*Подъем*) включаются контакторы *КВ*, *КЛ* и *КТ*, на статор двигателя подается напряжение и одновременно включением электромагнита тормоза *ТМ* освобождается тормозной шкив. При включении контактор *КТ* замыкающим вспомогательным контактом через замкнувшийся контакт *КЛ* включает реле *РБ*.

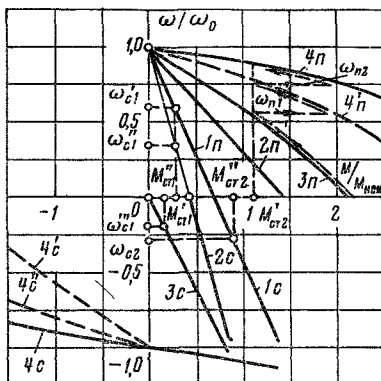


Рис. 3-16. Механические характеристики электропривода, управляемого панелью типа ТСА.

Одновременно с включением *КВ* происходит включение контактора *КП*, который главными контактами замыкает первую ступень реостата в роторной цепи двигателя.

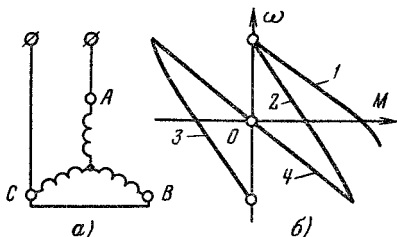
Таким образом, в положении 1 (*Подъем*) двигатель работает с одной выведенной контактором *КП* регулировочной ступенью реостата и имеет механическую характеристику *1п* (рис. 3–16). При перестановке командоконтроллера в положения 2, 3 и 4 последовательно срабатывают контакторы *КУ1* – *КУ4*, добавочное сопротивление в цепи ротора уменьшается.

Двигатель в этих положениях имеет регулировочные характеристики *2п* и *3п* и основную характеристику *4п*. При работе на основной характеристике в цепи ротора остается включенным небольшое сопротивление, что объясняется, как отмечалось выше, стремлением обеспечить пуск с заданными бросками тока при имеющемся числе роторных контакторов.

Установка командоконтроллера из положения 0 в положение 1 и затем в положение 2 (*Спуск*) не вызывает срабатывания каких-либо аппаратов, привод остается отключенным и заторможенным. В этом проявляется основное назначение реле *РБ*, которое разрешает включение двигателя при спуске только в положении 3 командоконтроллера. В этом положении замыкается контакт *К7*, получает питание контактор однофазного включения *КО* и включает своим вспомогательным контактом реле *РБ*, которое после этого остается включенным в любом другом положении *Спуск*. Реле *РБ* включает контактор *КТ*, электромагнит тормоза *ТМ* подключается к сети, колодки тормоза освобождают тормозной шкив.

Контактор *КО* своими контактами включает двигатель по схеме однофазного питания статора (рис. 3-17, *а*). В роторной цепи в положении 3 (*Спуск*) замкнуты контакты контактора *КУ1*, однако остающиеся ступени имеют значительное сопротивление. Известно, что однофазную систему напряжений на двигателе можно разложить, пользуясь методом симметричных составляющих, на симметричные системы трехфазных

Рис. 3-17. Схема однофазного включения двигателя (*а*) и соответствующие характеристики (*б*).



напряжений прямой и обратной последовательностей, имеющих одинаковую амплитуду.

На рис. 3-17, *б* представлена характеристика 1 двигателя в нормальной схеме при большом добавочном сопротивлении в роторной цепи. Характеристика 2 соответствует напряжению прямой последовательности, а характеристика 3 — напряжению обратной последовательности при однофазном включении. Результирующая характеристика представлена кривой 4. Рассматривая ее, можно заключить, что при однофазном включении с большим добавочным сопротивлением в роторе двигатель может работать только в тормозном режиме с характеристикой, подобной характеристике динамического торможения.

Таким образом, в положении 3 (*Спуск*) двигатель имеет механическую характеристику 3с (см. рис. 3-16). При переводе рукоятки командоконтроллера из положения 3 в положение 2 (*Спуск*) контактор *КО* отключается, а катушка контактора *КВ* получает питание через контакты *РБ*, *КУ1*, *КУ2* и *КН*, контактор *КЛ* включается и статор двигателя подключается к сети в направлении *Подъем*. Так как контактор *КУ1* отпадает, а контактор *КП* отключен, в роторную цепь вводится все добавочное сопротивление. Соответствующая характеристика 2с на рис. 3-16 предназначается для тормозного спуска средних грузов в режиме противовключения. Перевод рукоятки в положение 1 (*Спуск*) вызывает срабатывание контактора *КП*. Сопротивление роторной цепи уменьшается, что обеспечивает получение характеристики 1с, необходимой для тормозного спуска тяжелых грузов.

Если из положения 3 рукоятку командоконтроллера перевести в положение 4 (*Спуск*), включаются контакторы *КН* и *КЛ* и подключают статор двигателя к сети в направлении *Спуск*. Так как контакторы *КУ1* — *КУ4* срабатывают, в роторе остается лишь небольшая постоянно включенная ступень сопротивления и двигатель работает с основной характеристикой $4c$, обеспечивающей силовой спуск крюка и тормозной сверхсинхронный спуск грузов.

Таким образом, при спуске грузов реле *РБ* смещает исходное рабочее положение схемы из нулевого положения командоконтроллера в положение 3. Рассмотрим, по каким причинам введена такая блокировка. На рис. 3-16 показаны моменты статической нагрузки $M'_{ст1}$ и $M''_{ст1}$, соответствующие подъему и спуску одного и того же груза небольшого значения. При таком грузе при характеристике $2c$ вместо спуска груза будет происходить его подъем со скоростью ω'_{c1} , а в положении $1c$ — с большей скоростью ω'_{c1} . Только в положении 3, где двигатель работает в тормозном режиме, происходит спуск груза с небольшой скоростью ω''_{c1} . Нетрудно видеть, что рассматриваемая блокировка предотвращает подъем легких грузов на положениях командоконтроллера, соответствующих спуску.

В тех случаях, когда груз велик ($M'_{ст2}$ и $M''_{ст2}$), включение привода в третьем положении *Спуск* вызовет быстрое увеличение скорости спуска («просадку груза»). Чтобы этого избежать, крановщику предоставляется возможность при спуске тяжелых грузов до включения двигателя нажатием на педаль *НП* отключать блокировку первых положений командоконтроллера. Контакт *НП* в цепи контакта *К6* командоконтроллера, замыкаясь, подготавливает цепь включения контактора *КВ*, минуя контакт *РБ*. При установке командоконтроллера в положение 1 (*Спуск*) при замкнутом контакте *НП* включаются контакты *КВ* и *КЛ*, а через второй контакт педали — контактор *КТ*. Двигатель работает с характеристикой $1c$, обеспечивая небольшую скорость спуска тяжелого груза ω_{c2} . Одновременно контакты *КЛ* и *КТ* включают реле *РБ*, которое остается включенным во всех положениях спуска.

Схемой панели типа ТСА предусматривается автоматический контроль протекания переходных процессов пуска и торможения. При быстрой перестановке командоконтроллера из положения 0 в положение 4 (*Подъем*) срабатывают контакторы *КВ*, *КЛ*, *КТ*, *КП*, *КУ1* и *КУ2*. Реле времени *РУ1*, включившееся в положении 0, удерживает разомкнутый свой контакт в цепи катушек *КУ3* и *КУ4*. После включения *КУ2* цепь реле *РУ1* замыкается и оно начинает отсчитывать выдержку времени. В те-

чение этого времени двигатель ускоряется до первой скорости переключения $\omega_{п1}$ по характеристике $3n$ (рис. 3-16). По истечении выдержки времени PYI его контакт замыкается, срабатывает контактор $KY3$ и двигатель переходит на промежуточную пусковую характеристику $4n$. Так как контакт $KY3$ в цепи катушки $PБ$ разомкнулся, реле $PБ$ отсчитывает выдержку времени, в течение которой двигатель ускоряется до второй скорости переключения $\omega_{п2}$. После замыкания размыкающего контакта $PБ$ в цепи катушки контактора $KY4$ последний срабатывает, двигатель переходит на основную характеристику и разгоняется до установившейся скорости. При срабатывании контактора $KY4$ становится на самопитание и другим вспомогательным контактом вновь подключает катушку $PБ$ к напряжению выпрямителя.

Пуск в направлении спуска протекает аналогично по промежуточным пусковым характеристикам $4c'$ и $4c''$.

При быстрой перестановке командоконтроллера из положения 4 (Спуск) в нулевое благодаря выдержке времени реле $PБ$ происходит торможение двигателя противовключением при одновременном наложении механического тормоза. Совмещение механического и электрического торможения исключает просадку груза, уменьшает износ механического тормоза.

Рассматривая механические характеристики на рис. 3-16, можно заключить, что использование режима однофазного включения расширяет возможности регулирования скорости спуска легких и средних грузов. Однако жесткость всех механических характеристик при введении сопротивлений в цепь ротора невелика, поэтому практически требуемые малые скорости подъема и спуска различных грузов оператор поддерживает вручную кратковременными переключениями командоконтроллера в соответствующие соседние положения. Например, при нагрузке, соответствующей моменту $M'_{ст1}$, скорость спуска груза, меньшую ω'_{c1} (см. рис. 3-16), оператор может поддерживать, переставляя командоконтроллер из положения $3c$ в положение $2c$ и обратно.

Более широкие возможности регулирования скорости подъема и спуска грузов обеспечиваются использованием двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением, получающих питание от сети постоянного тока. Управление электроприводом при этом осуществляется с помощью магнитного контроллера типа ПС, схема которого приведена на рис. 3-18. В этой схеме к якорной цепи двигателя D напряжение подводится с помощью рубильника $P1$, на цепи управления напряжение подается через рубильник $P2$ и предохранитель $П$.

Реле *РН* в сочетании с нулевым контактом *К1* командоконтроллера *КК* осуществляет нулевую защиту и блокировку нулевого положения командоконтроллера. При исчезновении напряжения реле *РН* отпадает и отключает цепи управления. Вновь включиться при восстановлении напряжения реле *РН* может только после того, как рукоятка командоконтроллера будет установлена в нулевое положение и контакт *К1* замкнется. В цепь катушки *РН* введены контакты максимальных токовых реле *РМ1*, *РМ2* и контакты *ВКН* и *ВКВ* конечных вы-

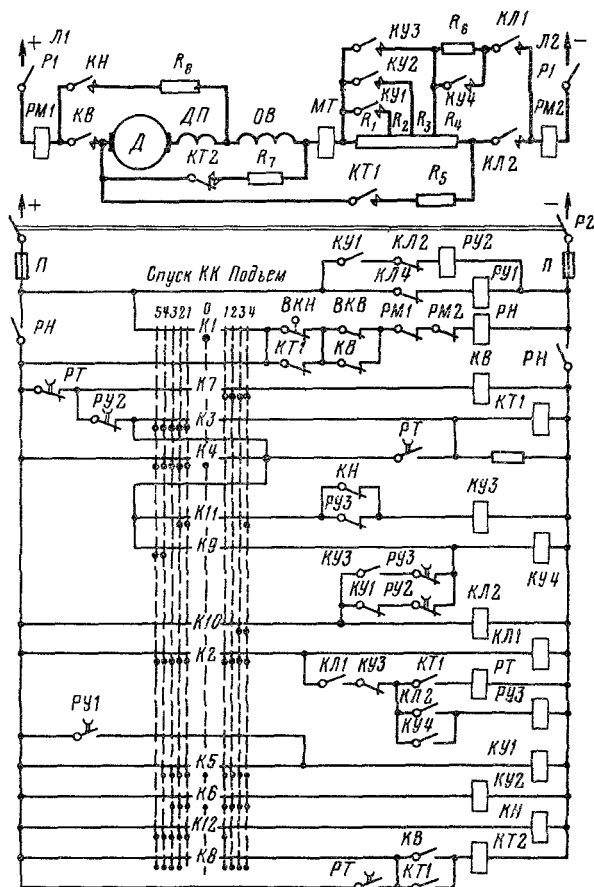


Рис. 3-18. Схема кранового магнитного контроллера типа ПС.

ключателей, ограничивающих ход крюка. Избирательное действие конечной защиты обеспечивается шунтированием контакта *ВКВ* размыкающим контактом *КВ*, который замкнут во всех положениях *Спуск*, а контакта *ВКН* — размыкающим контактом *КТ*, который замкнут на всех положениях *Подъем* и разомкнут на всех положениях *Спуск*.

Схемы включения силовых цепей двигателя для каждого положения *Подъем* показаны на рис. 3-19. В положении 1 двигатель включается по схеме шунтирования якоря, которая подробно рассматривалась в курсе теории электропривода.

Эта схема обеспечивает устойчивую пониженную скорость подъема грузов в соответствии с характеристикой *1n* на рис. 3-20. В положении 2 отпадает контактор *КН*, цепь шунтирования якоря размыкается. При этом двигатель работает на регулировочной реостатной характеристике *2n*.

При переходе к положению 3 добавочное сопротивление уменьшается (характеристика *3n*), а в положении 4 все сопротивления выводятся и двигатель работает на основной естественной характеристике *4n*.

Рассматривая эти характеристики, можно убедиться, что схема обеспечивает благоприятные регулировочные характеристики и что форма основной характеристики обеспечивает максимальную производительность за счет повышения скорости подъема легких грузов.

Однако подобное семейство характеристик не является удовлетворительным при спуске грузов. Схема шунтирования якоря при включении двигателя в сторону спуска обеспечивает при $\omega > \omega_0$ участок генераторного торможения, но жесткость характеристики в этой области быстро уменьшается с ростом нагрузки из-за уменьшения тока возбуждения и потока двигателя. Уменьшение потока двигателя снижает надежность торможения груза, так как при перегрузках возможен «разнос» двигателя опускающимся грузом.

Приведенный в § 3-1 анализ схемы безопасного спуска позволяет рассмотреть, каким образом регулируется скорость двигателя в схеме панели типа ПС при спуске грузов. Порядок

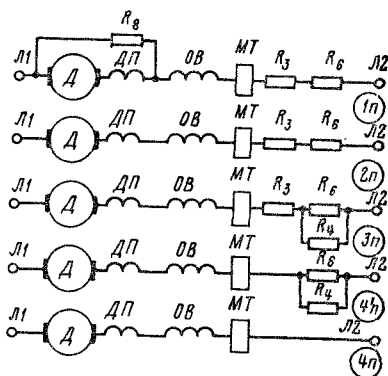


Рис. 3-19. Схема силовых цепей двигателя при подъеме.

включения контакторов и схемы включения двигателя в положениях «Спуск» представлены на рис. 3-21. Рассматривая схему, соответствующую положению 1, с учетом того, что сопротивление катушки MT $R_{MT} \approx 0$, можно установить, что она представляет собой схему безопасного спуска при $R_{дв} = 0$ и значительном сопротивлении $R_{д.с.}$ Этим обеспечивается минимальная скорость идеального холостого хода и небольшой

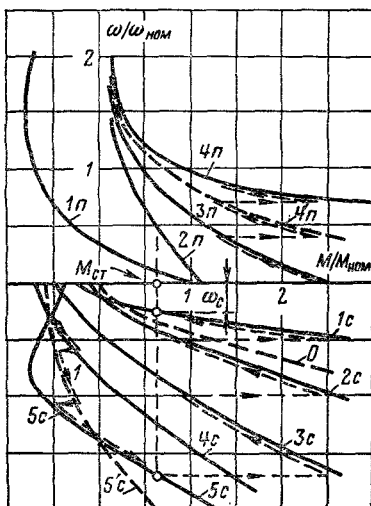


Рис. 3-20. Механические характеристики двигателя в схеме панели типа ПС.

пусковой момент, необходимый для силового спуска (характеристика 1с на рис. 3-20).

В положении 2 включается $KT2$ и своим размыкающим контактом отключает сопротивление R_7 , в результате чего сопротивление в цепи якоря $R_{д.я}$ увеличивается. При этом скорость холостого хода остается прежней, а пусковой момент уменьшается (характеристика 2с на рис. 3-20).

В положении 3 в цепь обмотки возбуждения вводится сопротивление R_3 , скорость идеального холостого хода возрастает (характеристика 3с).

В положении 4 в цепь обмотки возбуждения добавляется сопротивление R_2 и

выводится общее сопротивление R_6 . Эти переключения вызывают возрастание скорости холостого хода, пускового тока и момента двигателя (характеристика 4с).

В положении 5 в цепь обмотки возбуждения вводится добавочное сопротивление R_1 и выводятся добавочное сопротивление R_4 в цепи якоря. Двигатель при этом работает с основной характеристикой спуска 5с.

Механическая характеристика 5с (рис. 3-20) имеет форму, аналогичную форме характеристики асинхронного двигателя, что объясняется большим сопротивлением в цепи обмотки возбуждения. При $\omega = 0$ ЭДС двигателя $E_{дв} = 0$ и ток возбуждения (а следовательно, и магнитный поток) весьма мал. Из-за малости потока пусковой момент также мал. С ростом скорости возрастает ЭДС, увеличивается поток и уменьшается ток якоря,

причем вначале более существенным является рост потока, что и вызывает возрастание момента двигателя. При дальнейшем увеличении скорости ток стремится к нулю и момент быстро уменьшается.

Схемой предусматривается автоматический контроль протекания процессов пуска и торможения. Пуск на подъем контролируется реле времени РУ2 и РУ3. При быстрой перестановке

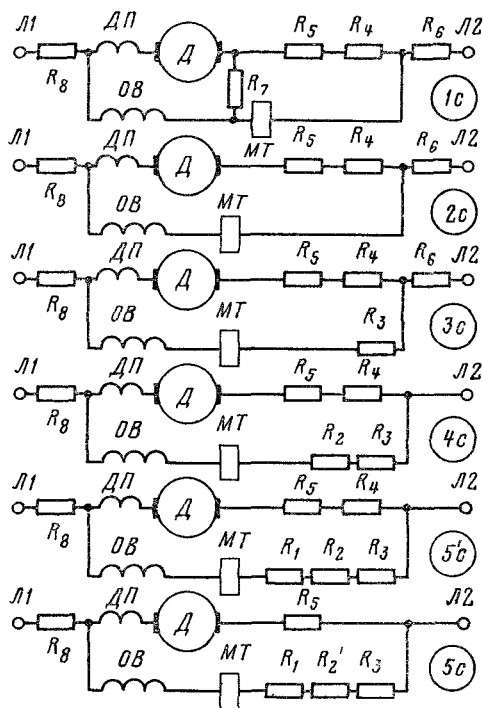


Рис. 3-21. Схемы включения двигателя при работе магнитного контроллера типа ПС на положениях Спуск.

командоконтроллера из положения 0 в положение 4 (Подъем) включаются контакторы КВ, КТ2, КЛ1, КЛ2 и остаются включенными КУ1 и КУ2. Силовые цепи двигателя собираются при этом по схеме, соответствующей положению 3 на рис. 3-19. При включении контакт КЛ2 размыкает цепь катушки реле РУ2 и оно отсчитывает выдержку времени, в течение которой двигатель разгоняется по характеристике $3n$ (рис. 3-20). По окончании выдержки времени РУ2 его контакт в цепи контакта

КЗ командоконтроллера замыкается, что приводит к включению контактора КУЗ. Контактор КУЗ силовым контактом выводит сопротивление R_3 , а размыкающим вспомогательным контактом разрывает цепь катушки реле РУЗ. В течение выдержки времени реле РУЗ двигатель ускоряется по пусковой характеристике $4'n$ и затем переходит на естественную характеристику $4n$, так как контактор КУ4 включается замкнувшимся контактом РУЗ, включенным последовательно с К10 и замыкающим контактом КУЗ.

Пуск на спуск контролируется реле времени РУ1 и РУ2. При перестановке контроллера из нулевого в пятое положение Спуск вначале включаются контакторы КТ1, КТ2, КН, КЛ1, КУ4, отпадает контактор КУ2 и остается включенным КУ1. При этом происходит разгон двигателя по характеристике 4с в течение выдержки времени реле РУ1, которую оно начало отсчитывать после срабатывания контактора КУ4, разомкнувшего свой контакт в цепи катушки РУ1. Когда якорь реле РУ1 отпадает, его контакт, шунтирующий К5, размыкаясь, отключает контактор КУ1. Двигатель переходит на промежуточную пусковую характеристику 5'с и продолжает разгоняться в течение выдержки времени реле РУ2, отсчет которой начался при размыкании контакта КУ1 в цепи его катушки. По окончании этой выдержки времени замыкается цепь размыкающих контактов КУ1 и РУ2, которая подает питание на катушку КЛ2. Двигатель выходит на основную характеристику спуска 5с. Введение промежуточной характеристики 5'с необходимо для ограничения тока якорной цепи, так как пусковой ток на характеристике 5с значительно больше, чем на характеристике 4с, несмотря на то что вследствие уменьшения потока $\Phi (I_B)$ пусковой момент на характеристике 5с невелик.

Процесс торможения при переходе из положения 5 в положение 1 (Спуск) контролируется реле времени РУЗ и РТ. Вначале отключаются контакторы КУ4 и КЛ2, включаются КУ1, КУ2 и остаются включенными КТ1, КЛ1, КН и КТ2. Двигатель переходит на характеристику 3с и замедляется в течение выдержки времени реле РУЗ, цепь катушки которого разомкнули при отключении контакты КЛ2 и КУ4. Когда выдержка времени РУЗ заканчивается, его контакт в цепи катушки контактора КУЗ замыкается, контактор КУЗ срабатывает, осуществляя переход на характеристику 2с. Одновременно размыкающий контакт КУЗ размыкает цепь катушки РТ. По окончании выдержки времени реле РТ оно размыкает свой контакт в цепи катушки КТ2, контактор КТ2 отключается. Двигатель при этом переходит на характеристику 1с, процесс замедления заканчи-

вается при установившейся скорости ω_c , соответствующей моменту нагрузки $M_{ст}$ (см. рис. 3-20).

Торможение при переходе из положения 5 (Спуск) в нулевое контролируется реле времени PT . Этот процесс поясняется схемами и характеристиками, приведенными на рис. 3-22, а–в. Вначале отпадают контакторы $КН$, $КУ4$, $КЛ1$, $КЛ2$, включаются $КУ1$ и $КУ2$, а контакторы $КТ1$, $КТ2$ остаются включенными. Реле PT отсчитывает выдержку времени, в течение

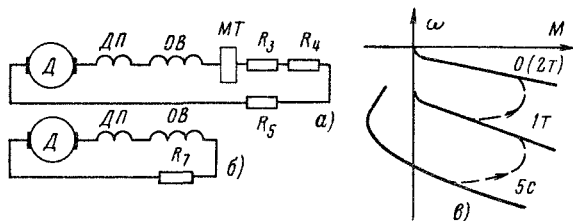


Рис. 3-22. Схемы включения при установке командоконтроллера в нулевое положение (а, б) и соответствующие характеристики $\omega = f(M)$ (в).

которой двигатель включен по схеме, приведенной на рис. 3-22, а. Происходит динамическое торможение двигателя с самовозбуждением, характеристика которого $1m$ представлена на рис. 3-22, в. По истечении выдержки времени реле PT размыкает свои замыкающие контакты, что вызывает отпадание контакторов $КТ1$ и $КТ2$. Схема включения двигателя, соответствующая положению 0, показана на рис. 3-22, б, а характеристика представлена кривой $2m$ на рис. 3-22, в. Как видно из схемы, при отпадании контакторов $КТ1$ и $КТ2$ катушка электромагнита тормоза током не обтекается, накладывается механический тормоз. Переходы с характеристики на характеристику показаны плавными пунктирными кривыми, так как магнитный поток двигателя при торможении с самовозбуждением изменяется плавно из-за электромагнитной инерции.

3.4. УПРАВЛЕНИЕ ПОДЪЕМНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТАМИ

Промышленность выпускает подъемные электромагниты серий М и ПМ, предназначенные для транспортировки грузов из ферромагнитных материалов при температуре не выше 500°C . Катушки электромагнитов рассчитаны на номинальное напряжение 110 или 220 В при

номинальной продолжительности включения $PB_{\text{ном}} = 50\%$. Подъемная сила электромагнита зависит от плотности поднимаемого груза:

Поднимаемый груз	Подъемная сила, кгс, для электромагнитов типа		
	M22B	M42B	M62B
Болванка или плита	6000	16 000	20 000
Чугун в чушках и скрап стальной	200	600	1800
Стружка стальная	80	200	600

Для управления подъемными магнитами серийно выпускается панель управления (магнитный контроллер) типа ПМС, принципиальная схема которого представлена на рис. 3-23. Схема предусматривает выполнение следующих операций и блокировок:

- 1) включение катушки электромагнита на напряжение;
- 2) размагничивание электромагнита при разгрузке путем включения его на напряжение противоположной полярности;
- 3) дуговую блокировку контактов, переключающих катушку электромагнита;
- 4) автоматическое отключение электромагнита в конце размагничивания при токе обратного направления 20–30% номинального.

При замкнутом рубильнике $1P$ включение электромагнита производится замыканием контакта выключателя BV . При этом включается контактор B и своими силовыми контактами подключает катушку электромагнита $ЭМ$ к сети, а размыкающим вспомогательным контактом разрывает цепь катушки H , предотвращая случайное одновременное включение контакторов.

Для разгрузки выключается BV , контактор B отпадает, замыкается цепь контактора размагничивания H . Однако до тех пор, пока не погаснет дуга на силовых контактах B , можно считать, что электромагнит остается подключенным к сети. Так как сопротивление $R_{д1} + R_p + R_{д2}$ в 5–6 раз превышает сопротивление катушки электромагнита $R_{эм}$, то ток I_p в этих сопротивлениях, включенных параллельно катушке, в 5–6 раз меньше, чем ток катушки $ЭМ$. При этом напряжение на катушке контактора H равно:

$$U_{к0} = U_{12} + U_{23} = I_p(R_{12} + R_{23}),$$

где $R_{12} + R_{23} \approx R_{эм}$.

Этого напряжения недостаточно для срабатывания контактора H . Таким образом осуществляется дуговая блокировка, разрешающая включение H только после погасания дуги на контактах B . Кривые, характеризующие изменения тока электромагнита и напряжения во времени, показаны на рис. 3-23. Время погасания дуги обозначено на этом рисунке отрезком t_1 .

Второй этап — от момента погасания дуги до момента замыкания контактов H — обозначен t_2 . На этом участке ток электромагнита под

действием ЭДС самоиндукции протекает по разрядному сопротивлению R_p . Вследствие большой электромагнитной инерции ток не успевает заметно снизиться, поэтому здесь $I_{эм} \approx I_{ном}$.

При этом напряжение U_{Hmax} на катушке H достаточно для его срабатывания.

Третий этап — от момента замыкания контактов H до момента, где $I_{эм} = 0$, обозначен на рис. 3-23 отрезком t_3 . Здесь напряжение на катушке H можно определить из соотношения

$$U_H = I_{эм} R_{12} + I_p R_{23} = I_{эм} R_{12} + \frac{U_c}{R_p} R_{23}.$$

Нетрудно видеть, что с уменьшением тока катушки электромагнита напряжение U_H уменьшается, однако при токе $I_{эм} = 0$ оно еще достаточно для удержания контактора H во включенном положении.

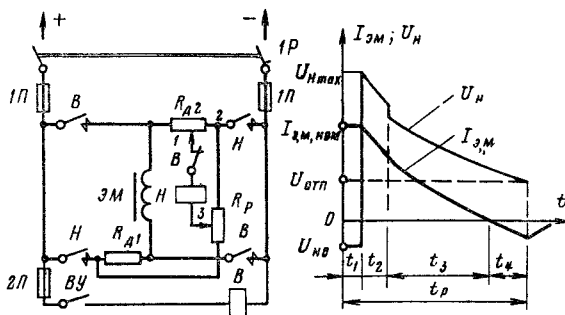


Рис. 3-23. Схема панели типа ПМС (а) и зависимости $I_{эм}$, $U_H = f(t)$ (б).

На следующем этапе под действием приложенного напряжения ток электромагнита меняет направление на противоположное и возрастает, перемагничивая электромагнит. При этом напряжение U_H продолжает уменьшаться:

$$U_H = -I_{эм} R_{12} + \frac{U_c}{R_p} R_{23}.$$

В момент $t = t_p$ напряжение на катушке H уменьшается до значения $U_H = U_{отп}$, при котором контактор H отпадает. Выбором точки 3 на резисторе R_p настраивается отпадание контактора H при токе $I_{эм} = -(0,2 \div 0,3) I_{ном}$. Контактор H отключает от сети электромагнит, который остается замкнутым на разрядное сопротивление, уменьшающее перенапряжение на катушке электромагнита.

Время размагничивания $t_p = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ зависит от индуктивности электромагнита. При большой массе ферромагнитного груза индуктивность $I_{эм}$ велика, соответственно продолжительность размагничивания больше. При малой массе груза время размагничивания автоматически сокращается.

3.5. ЭЛЕКТРОПРИВОД ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ОДНОКОВШОВЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

В § 1-2 было показано, что основными механизмами одноковшовых экскаваторов являются механизмы подъема, напора (тяги) и поворота, обеспечивающие в рабочем процессе перемещение ковша по требуемым пространственным траекториям. Механизмы хода экскаватора-лопаты и шагания экскаватора-драглайна в рабочем цикле не участвуют, а предназначаются для передвижения машины в новое положение после выработки забоя в пределах, определяемых размерами рабочего оборудования. При передвижении электроприводы основных механизмов отключаются и затормаживаются механическими тормозами. Таким образом, механизмы хода и шагания играют важную, но для рабочего процесса вспомогательную роль.

Кроме того, на экскаваторах средней и большой производительности имеется ряд других вспомогательных электроприводов. К их числу относятся электропривод компрессора, который автоматически поддерживает требуемое давление воздуха для управления механическими тормозами главных приводов; двигатели вентиляторов кузова экскаватора и охлаждения электрических машин; приводные двигатели преобразовательных агрегатов. Для облегчения монтажа машины и ее ремонтов экскаваторы оборудуются монтажными лебедками, талями, а в машинных залах крупных экскаваторов с емкостью ковша выше 6 м^3 обычно устанавливается мостовой кран необходимой грузоподъемности. Нетрудно видеть, что эти механизмы являются типовыми общепромышленными механизмами и здесь дополнительного рассмотрения их электроприводов не требуется.

Производительность одноковшового экскаватора обеспечивается требуемой мощностью его главных электроприводов и их необходимыми статическими и динамическими характеристиками. Хотя режимы работы основных механизмов экскаваторов аналогичны рабочим режимам крановых механизмов, а аналогия экскаваторов с поворотными стреловыми кранами очевидна, необходимость осуществления дополнительных более сложных пространственных манипуляций с рабочим органом в процессе черпания грунта и его транспортировки требует более высокой управляемости электроприводов и повышения точности регулирования основных переменных. Общие требования к электроприводам машин типа командных манипуляторов, сформулированные в гл. 2, справедливы как для кранов, так и для экскаваторов, однако для экскаваторов их

количественные характеристики выше, а условия реализации сложнее.

Электрооборудование экскаватора эксплуатируется в весьма тяжелых условиях тряски, вибраций, ударов, большой запыленности, повышенной влажности, при широких пределах изменения температуры окружающей среды. Электроприводы основных механизмов работают в интенсивном повторно-кратковременном режиме, с большой частотой включений, при изменяющейся в широких пределах нагрузке на валу двигателей, с систематическими перегрузками электроприводов механизмов, участвующих в процессах черпания грунта, при высокой вероятности тяжелых перегрузок вплоть до стопорения этих электроприводов. Для основных механизмов экскаваторов характерно существенное влияние упругих механических связей, зазоров в передачах и рабочем оборудовании, а также кинематических погрешностей передач электропривода поворота.

Электроприводы основных механизмов экскаваторов с емкостью ковша до 10 м^3 имеют мощности, измеряемые сотнями, а свыше 10 м^3 — тысячами киловатт, что определяет существенное влияние энергетических показателей системы электропривода на удельный расход энергии на кубометр вынутого грунта; при этом следует иметь в виду, что экскаваторы работают в полевых условиях и получают питание от электрических сетей ограниченной мощности. Если к перечисленному добавить отмеченную выше необходимость повышенной управляемости приводов, можно заключить, что по сложности требований к электроприводу экскаваторы среди рассматриваемых производственных механизмов занимают одно из первых мест.

Проведенный в гл. 2 анализ общих требований к электроприводу машин, управляемых оператором, а также анализ режимов и условий работы экскаваторных электроприводов позволяет сформулировать основные требования, предъявляемые к главным электроприводам экскаваторов. При этом важнейшим является требование обеспечения максимальной производительности машины при минимальных нагрузках ее электрического и механического оборудования. Для выполнения этого общего требования необходимо, чтобы система электропривода обладала следующими свойствами:

- 1) электропривод должен обеспечивать надежное ограничение момента и тока допустимым стопорным значением во всех режимах работы, т. е. обладать механической характеристикой экскаваторной формы, заполнение которой при проектировании и наладке можно было бы изменять в широких пределах,

в соответствии с условиями работы каждого механизма экскаватора;

2) электропривод должен обеспечивать экономичное регулирование скорости в диапазоне 4—6 и рекуперацию энергии, освобождающейся при торможениях механизма поворота или при опускании ковша. Жесткость рабочего участка механической характеристики, соответствующей нулевому положению командоконтроллера, должна обеспечивать достаточно малую скорость спуска ковша при удержании его путем электрического торможения;

3) формирование переходных процессов, имеющих минимальную длительность при ограничениях, наложенных на предельные значения момента, темпа его изменения и ускорения, обеспечивающих минимальные динамические нагрузки механического оборудования экскаватора, должно осуществляться достаточно простыми и надежными средствами;

4) схема соединения силовых цепей и динамические свойства системы управления электроприводом должны способствовать реализации возможного демпфирующего действия, которое оказывает электропривод с линейной механической характеристикой на механические колебания в электромеханической системе;

5) схема должна быть простой и максимально надежной.

Удовлетворить всем перечисленным требованиям может лишь система электропривода, обеспечивающая непрерывное управление скоростью механизма во всех режимах с высокими показателями точности и качества регулирования основных координат. Поэтому для индивидуального электропривода основных механизмов одноковшовых экскаваторов с емкостью ковша выше 2 м³ в настоящее время применяются двигатели постоянного тока с независимым возбуждением, управляемые изменением напряжения в цепи якоря по системе управляемый преобразователь — двигатель (УП — Д). В качестве управляемого преобразователя может быть использован генератор постоянного тока (Г — Д) или тиристорный преобразователь (ТП — Д).

Для удовлетворения трех первых требований система управления должна обладать достаточно высоким коэффициентом усиления, что достигается введением в схему управления полем генератора усилителя того или иного вида. До недавнего времени преимущественное применение в качестве возбудителя генераторов находил электромашинный усилитель с поперечным полем (ЭМУ). В настоящее время ЭМУ на вновь выпускаемых экскаваторах вытеснен более надежными, обладающими ста-

бильной характеристикой силовыми магнитными усилителями, а на мощных экскаваторах, где требуемая номинальная мощность усилителя превышает 5—10 кВт, в качестве возбудителей генераторов используются тиристорные усилители.

Индивидуальные генераторы главных электроприводов экскаватора объединяются в преобразовательный агрегат, который приводится во вращение асинхронным или, чаще, синхронным двигателем с номинальным напряжением статора 3 или 6 кВ. На этом напряжении и осуществляется питание экскаватора от передвижного распределительного устройства с помощью гибкого шлангового высоковольтного кабеля. Для питания остальных двигателей на экскаваторе устанавливается силовой трансформатор 3—6/0,4 кВ, а для освещения — трансформаторы 380/127 и 380/220 В.

В соответствии с требованием ограничения момента двигателя допустимым стопорным значением во всех режимах работы главной регулируемой координатой электромеханической системы является ток якоря двигателя, а основной обратной связью в системе управления — отрицательная связь по току. Требования к жесткости рабочего участка экскаваторных характеристик не являются высокими, так как указанный диапазон регулирования скорости мощного электропривода при регулировании напряжением может быть получен даже в разомкнутой системе. Для получения требуемой жесткости характеристики для удержания ковша при установке командоконтроллера в нулевое положение, а также для уменьшения влияния на скорость гистерезиса в магнитной цепи генератора, температурных изменений сопротивлений и колебаний напряжения сети в современных экскаваторных электроприводах используется отрицательная обратная связь по напряжению преобразователя. Кроме того, для получения требуемого качества регулирования тока и напряжения в ряде случаев возникает необходимость использования гибких связей по регулируемым переменным.

До недавнего времени основной структурой регулируемого экскаваторного электропривода по системе Г — Д являлась структура с суммирующим усилителем (см. рис. 2-25, а). В последние годы на большинстве выпускаемых в нашей стране экскаваторов находят применение схемы, имеющие многоконтурную структуру подчиненного регулирования координат электропривода. Проведенный в § 2-8 анализ свойств двухконтурной структуры подчиненного регулирования тока и скорости двигателя (см. рис. 2-27) показал, что она в применении к электроприводу командных манипуляторов наряду с очевидными

достоинствами обладает рядом существенных недостатков, которые могут находиться в противоречии с основными требованиями, предъявляемыми к экскаваторному электроприводу в отношении жесткости рабочего участка статической характеристики, точности регулирования тока и ограничения ускорений в переходных процессах. Кроме того, структура, представленная на рис. 2-27, требует применения тахогенератора и рассчитана на реализацию регуляторов с помощью элементов УБСР, в то время как на экскаваторах в связи с тяжелыми условиями эксплуатации представляют особый интерес более простые и надежные схемные решения, но сохраняющие преимущества систем подчиненного регулирования.

С учетом этого для экскаваторных электроприводов разработана унифицированная структура, представленная на рис. 3-24. Рассматривая эту схему, легко установить, что она является двухконтурной системой подчиненного регулирования тока якоря двигателя и напряжения преобразователя. В качестве регулятора тока PT используется И-регулятор с постоянной интегрирования $T_{\text{и}}$. Следовательно, постоянная якоря $T_{\text{я}}$ предполагается некомпенсируемой. Сигналы задания тока $u_{\text{з,т}}$ и отрицательной обратной связи по току якоря $u_{\text{о,т}} = k_{\text{о,т}} i_{\text{я}}$ суммируются на входе дополнительного звена ограничения 30, имеющего характеристику «вход — выход» с ограничением выходной величины. Во всех режимах, в которых ток якоря значительно отличается от стопорного, пропорциональный усилитель 30 работает на линейной части своей характеристики, и работа контура регулирования тока не имеет отличий от рассмотренной в § 2-8. Однако в легких переходных процессах пусковой ток уменьшается, разность $u_{\text{з,т}} - k_{\text{о,т}} i_{\text{я}}$ возрастает и достигает порогового значения. При этом усилитель 30 «насыщается» и работает как звено ограничения, подавая на вход регулятора тока постоянный сигнал.

$$U_{\text{з,о,тах}} = T_{\text{и}} \frac{du_{\text{у}}}{dt} = \frac{cT_{\text{и}}}{k_{\text{и}}} \epsilon_{\text{доп}}, \quad (3-16)$$

где $\epsilon_{\text{доп}}$ — допустимое ускорение двигателя.

Электродвижущая сила $e_{\text{п}}$ преобразователя нарастает в этом режиме по линейному закону с предельно допустимым по условию ограничения ускорений темпом независимо от тока якоря. Если за счет увеличения нагрузки ток возрастет, то разность $u_{\text{з,т}} - u_{\text{о,т}}$ станет меньше порогового напряжения звена ограничения — система начнет регулировать ток, как это и должно быть в тяжелых режимах, ограничивая его стопорным значением. Таким образом, за счет введения звена ограничения 30

в экскаваторном электроприводе обеспечивается ограничение максимальных ускорений.

Вместо отрицательной связи по скорости в схеме используется отрицательная обратная связь по напряжению преобразователя. Сигнал, задающий уровень напряжения (скорости двигателя) $u_{3,н}$ и сигнал обратной связи по напряжению $u_{0,н}$ суммируются на входе пропорционального регулятора напряжения $РН$. Для получения требуемой жесткости рабочего участка механической характеристики привода при регулировании напряжения на вход регулятора напряжения $РН$ подается сигнал положительной обратной связи по току $i_{п,т}$. Если положительная связь по току подается на вход $РН$ с коэффициентом $k_{п,т} = 1/k_{р,н}$ где $k_{р,н}$ — коэффициент усиления регулятора напряжения, то при работе $РН$ в пределах линейной части своей характеристики его выходное напряжение $u_{4,т}$ содержит составляющую, в каждый момент численно равную сигналу отрицательной связи по току, воздействующему на вход звена 30. Следовательно, при такой настройке положительная связь по току компенсирует действие внутреннего контура тока, направленное на смягчение механической характеристики, и систему можно рассматривать как разомкнутую по току якоря.

Благодаря компенсации действия отрицательной связи по току обеспечивается поддержание постоянства напряжения на двигателе и жесткость рабочего участка в данной схеме получается достаточно высокой для любого экскаваторного электропривода. Одновременно устраняется отмеченная в § 2-8 связь между жесткостью статической характеристики и качеством переходных процессов, свойственная системе с последовательной коррекцией. Подбором коэффициента положительной обратной связи по току якоря можно установить любую требуемую жесткость рабочего участка экскаваторных характеристик.

При работе в зоне токоограничения регулятор напряжения, как и регулятор скорости в схеме на рис. 2-27, насыщен и выдает на выходе постоянное напряжение $u_{3,т} = U_{3,т,макс} = \text{const}$. Тем самым прекращается действие отрицательной связи по напряжению и положительной связи по току — система работает как одноконтурная система регулирования тока, так же как и в схеме на рис. 2-27.

Интегральный регулятор тока не компенсирует постоянную времени якорной цепи $T_{я}$. За счет этого суммарная некомпенсируемая инерционность $T_{\Sigma} = T_{п} + T_{я}$ возрастает, и быстродействие системы при последовательной коррекции может быть, как выше было показано, совершенно неудовлетворительным.

В рассматриваемой структуре этот недостаток устраняется за счет введения в сигнал отрицательной связи составляющей, пропорциональной производной регулируемой величины. Говоря строго, это эквивалентно применению смешанной последовательно-параллельной коррекции, однако структура позволяет для выбора параметров и оптимизации применить основной подход, свойственный методу последовательной коррекции, дополнив его некоторыми изменениями в соответствии с использованием смешанной коррекции.

Опыт наладки экскаваторных электроприводов показывает что для получения требуемых динамических качеств привода достаточно осуществить настройку контура регулирования тока в режиме короткого замыкания (при снятом возбуждении двигателя) и контура регулирования напряжения в режиме хо-

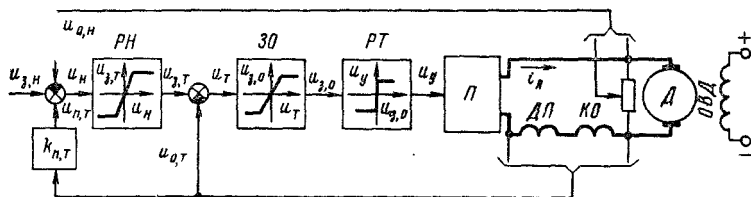


Рис. 3-24. Унифицированная структура экскаваторных электроприводов.

лостого хода (при разомкнутой якорной цепи). При оптимальной настройке контуров в этих искусственных режимах обеспечивается близкая к оптимальной динамика привода в рабочем состоянии.

Заметим, что режим короткого замыкания в точности соответствует условиям работы схемы при отсутствии внутренней связи по ЭДС двигателя. В [4] было показано, что пренебрежение внутренней связью по ЭДС является одним из главных допущений метода синтеза многоконтурных систем подчиненного регулирования. Поэтому оптимизация контура тока по режиму короткого замыкания лишь поясняет смысл этого допущения, а формальных отличий от рассмотренного в § 2-8 метода синтеза не имеет. Настройка контура напряжения по режиму холостого хода применима лишь к схеме, приведенной на рис. 3-24, и ей подобным. Основанием для этого является использование обратной связи по напряжению вместо обратной связи по скорости и применение компенсирующей положительной связи по току якоря, благодаря которой при

работе контура напряжения цепи обратных связей по току можно считать разомкнутыми.

Структурная схема контура тока в режиме короткого замыкания представлена на рис. 3-25, а.

Передаточная функция объекта регулирования тока

$$W_{o,p,t} = \frac{k_{3,0}k_{\Pi}/R_{я,\Sigma}}{(1+pT_{я})(1+pT_{\Pi})} \approx \frac{k_{3,0}k_{\Pi}/R_{я,\Sigma}}{1+pT_{\mu}},$$

где $k_{3,0}$, k_{Π} — коэффициенты усиления соответственно звена ограничения 30 и преобразователя Π ;

$$T_{\mu} = T_{я} + T_{\Pi}.$$

В соответствии с рассмотренным выше методом последовательной коррекции примем, что передаточная функция регуля-

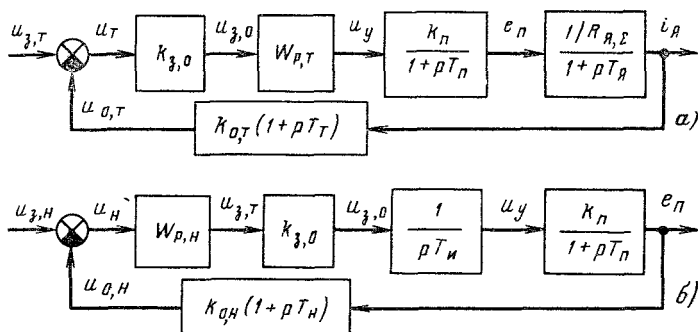


Рис. 3-25. Оптимизация динамики экскаваторного электропривода по режиму короткого замыкания (а) и холостого хода (б).

тора тока должна быть выбрана с таким расчетом, чтобы получить передаточную функцию разомкнутого контура тока вида

$$W_{раз,т} = \frac{1/k_{0,т}}{T_{0,т}p(T_{\mu}p + 1)},$$

где $T_{0,т}$ — постоянная интегрирования контура тока.

По аналогии с (2-69) определяется передаточная функция регулятора тока

$$W_{p,t} = \frac{W_{раз,т}}{W_{o,p,t}} = \frac{R_{я,\Sigma}}{k_{3,0}k_{\Pi}k_{0,т}T_{0,т}p} = \frac{1}{T_{\Pi}p}, \quad (3-17)$$

где $T_{\Pi} = k_{3,0}k_{\Pi}k_{0,т}T_{0,т}/R_{я,\Sigma}$.

Передаточная функция замкнутого контура тока будет иметь вид:

$$W_{\text{зам.т}} = \frac{1/k_{0,т}}{T_{0,т}T_{\mu}p^2 + (T_{0,т} + T_{\tau})p + 1}. \quad (3-18)$$

Рассматривая (3-18), можно убедиться, что введение в контур регулирования сигнала, пропорционального производной тока, расширяет возможности настройки, нарушая жесткую связь между соотношением постоянных времени и характером процессов. Корни характеристического уравнения (3-18)

$$p_{1,2} = \frac{1}{T_{0,т}} \left(-\frac{a_{\tau}'}{2} \pm \sqrt{\frac{a_{\tau}'^2}{4} - a_{\tau}} \right), \quad (3-19)$$

где $a_{\tau}' = (T_{0,т} + T_{\tau})/T_{\mu} = a_{\tau} + T_{\tau}/T_{\mu}$.

Таким образом, представляется возможность при любом соотношении постоянных a_{τ} получить требуемое качество процесса, подобрав значение гибкой составляющей T_{τ} , обеспечивающее соответствующий дискриминант характеристического уравнения (3-18). Так, для критического демпфирования (граничного случая аperiodического процесса при равенстве дискриминанта нулю) можно найти следующее условие: $a_{\tau, \text{опт}}' = 2\sqrt{a_{\tau}}$, откуда

$$T_{\tau} = T_{\mu}(2\sqrt{a_{\tau}} - a_{\tau}). \quad (3-20)$$

Если выбрать $a_{\tau} = 4$, то в соответствии с (3-20) $T_{\tau} = 0$, что соответствует случаю чисто последовательной коррекции. При $a_{\tau} < 4$ $T_{\tau} \neq 0$, т. е. для получения требуемого качества процесса необходимо вводить гибкую связь по регулируемой величине. Так как $T_{0,т} = a_{\tau}T_{\mu}$, то значение a_{τ} непосредственно определяет постоянную интегрирования регулятора тока T_{μ} и как следствие расхождение между статической и динамической характеристиками в соответствии с (2-76) и (2-77).

Использование гибкой связи по току позволяет выбирать значение $a_{\tau, \text{опт}}$ из условия получения минимума допустимого значения ΔI_{ω} в соответствии с (2-76). Подставляя найденное таким образом значение $a_{\tau, \text{опт}}$ в (3-20), определяем постоянную гибкой связи по току $T_{\tau, \text{опт}}$, обеспечивающую аperiodический характер процессов.

Максимальное выходное напряжение звена ограничения 30 вычисляется по (3-16).

Структурная схема контура регулирования напряжения в режиме холостого хода с учетом полученной передаточной функции регулятора тока представлена на рис. 3-25, б. Как и ранее,

желаемая передаточная функция разомкнутого контура имеет вид:

$$W_{\text{раз,н}} = \frac{1/k_{0,н}}{T_{0,н}p(T_{\mu,н}p + 1)},$$

где $T_{\mu,н} = T_{\Pi}$.

Аналогично (2-73) определяется передаточная функция регулятора напряжения

$$W_{p,н} = \frac{W_{\text{раз,н}}}{W_{0,p,н}} = \frac{T_{\Pi}}{k_{3,0}k_{\Pi}k_{0,н}T_{0,н}} = k_{p,н},$$

где $W_{0,p,н} = k_{3,0}k_{\Pi}/pT_{\Pi}(1 + pT_{\mu,н})$.

Передаточная функция замкнутого контура регулирования напряжения

$$W_{\text{зам,н}} = \frac{1/k_{0,н}}{T_{0,н}T_{\mu,н}p^2 + (T_{0,н} + T_{\Pi})p + 1}. \quad (3-21)$$

Полученная передаточная функция аналогична (3-18) и обеспечивает те же возможности настройки путем подбора значений a'_{Π} , a_n и T_n , какие были установлены для контура тока. Следует, однако, иметь в виду, что для контура напряжения нет очевидного критерия для выбора значения a_n . Поэтому для этого контура целесообразно проверить качество регулирования при $T_n = 0$ и ввести гибкую связь лишь в том случае, если какой-либо показатель неудовлетворителен.

Полученные несложные соотношения являются приближенными, но они могут служить хорошим ориентиром при наладке сложных систем, имеющих рассматриваемую структуру. Благодаря использованию смешанной последовательно-параллельной коррекции данная структура электропривода может быть реализована как с помощью элементов УБСР, так и с помощью достаточно простых и надежных магнитных усилителей. В последнем случае основные особенности рассмотренной схемы сохраняются за счет использования формирующей положительной связи по напряжению. Такие реализации наиболее рациональны для экскаваторных электроприводов по системе Г — Д и рассматриваются в § 3-7.

3-6. СХЕМЫ ЭКСКАВАТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С СУММИРУЮЩИМ УСИЛИТЕЛЕМ

Структура с суммирующим усилителем наиболее характерна для экскаваторных электроприводов по системе Г — Д с электромагнитным усилителем в качестве возбудителя генератора. Основные особенности таких схем можно кратко проанализировать, рассматри-

вая упрощенную принципиальную схему двухдвигательного электропривода, приведенную на рис. 3-26. Якоря двигателей $D1$ и $D2$ получают питание от генератора G . Обмотки возбуждения двигателей $ОВД1$ и $ОВД2$ включены параллельно с разрядным резистором R_p и через резистор $R_{д1}$ получают питание от бортовой сети постоянного тока. Обмотка возбуждения генератора $ОВГ$ получает питание от электромашинного усилителя $У$, имеющего четыре обмотки управления: обмотку $ОСН$, которая используется для получения гибкой

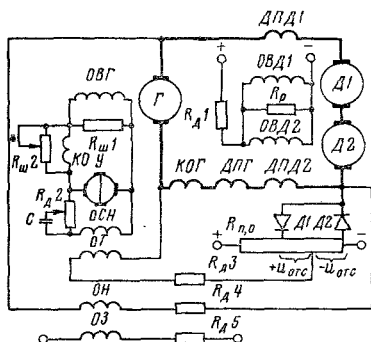


Рис. 3-26. Схема электромашиного управления электроприводом экскаватора.

и жесткой отрицательной обратной связи по напряжению ЭМУ; задающую обмотку $ОЗ$; обмотку отрицательной связи по току якоря генератора $ОТ$; обмотку отрицательной связи по напряжению генератора $ОН$.

Жесткая отрицательная связь по напряжению ЭМУ является внутренней связью схемы управления электроприводом и вводится для уменьшения неоднозначности характеристики ЭМУ, обусловленной явлением гистерезиса. Для форсирования переходных процессов ЭМУ выбирается обычно с трех-четырекратным запасом по напряжению, и в устано-

вившихся режимах при номинальной скорости электропривода его напряжение в 3–4 раза меньше номинального. Так как остаточная ЭДС ЭМУ может достигать 10–15% номинального значения, возможный разброс значений ЭДС ЭМУ, обусловленный петлей гистерезиса, соизмерим с напряжением, необходимым для получения номинального напряжения генератора, и вызывает нестабильность статических характеристик и переходных процессов привода. Жесткая отрицательная связь по напряжению ЭМУ сужает петлю гистерезиса в требуемой степени. Однако при этом снижается коэффициент усиления ЭМУ и увеличивается его колебательность. Для улучшения качества регулирования напряжения ЭМУ резистор $R_{д2}$ шунтирован конденсатором C , который обеспечивает гибкую составляющую в сигнале обратной связи, воздействующую на обмотку $ОСН$.

Получение требуемой жесткости рабочего участка механических характеристик обеспечивается жесткой отрицательной связью по напряжению генератора, воздействующей на обмотку $ОН$. Необходимое качество регулирования напряжения генератора и скорости электропривода достигается введением внутренней гибкой связи, обусловленной предусмотренным для этой цели резистором $R_{ш1}$, включенным параллельно обмотке возбуждения генератора $ОВГ$. Резистор $R_{ш1}$ в динамике, когда из-за большой индуктивности ток в обмотке возбуждения генератора отстает от напряжения ЭМУ, потребляет от ЭМУ значи-

тельный ток, пропорциональный напряжению возбуждения. С помощью резистора $R_{ш2}$, шунтирующего компенсационную обмотку ЭМУ KO , устанавливается недокомпенсация, при которой ток через резистор $R_{ш1}$ оказывает на ЭМУ воздействие, аналогичное воздействию обратной связи по производной ЭДС генератора.

Для формирования экскаваторных характеристик в цепи обмотки OT , осуществляющей отрицательную связь по току якоря, предусмотрен узел отсечки по току, состоящий из потенциометра отсечки $R_{п,от}$.

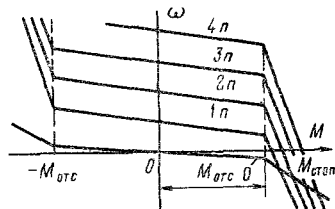


Рис. 3-27. Механические характеристики электропривода по схеме на рис. 3-26.

с двух плеч которого снимаются напряжения $+U_{отс}$ и $-U_{отс}$ и вводятся в цепь обмотки $OTс$ помощью диодов $D1$ и $D2$ встречно по отношению к напряжению ΔU_T любой полярности.

Семейство механических характеристик, соответствующее рассмотренной схеме применительно к электроприводу подъема, показано на рис. 3-27. Характеристики $1n-4n$ соответствуют работе в направлении «Подъем». Аналогичные характеристики имеет электропривод и при спуске ковша, причем для увеличения скорости спуска порожнего ковша используется ослабление поля двигателей. Характеристика 0 соответствует нулевому положению командоконтроллера и используется для удержания ковша без наложения механического тормоза. Ее жесткость увеличена за счет уменьшения добавочного сопротивления в цепи обмотки $ОН$. Переключение этого добавочного сопротивления и ограничение тока якоря при переходе на характеристику 0 в процессе торможения осуществляется с помощью контактов реле управления.

Рассмотренной схеме присущи перечисленные в § 2-8 недостатки систем с суммирующим усилителем, но наряду с этим можно указать ряд недостатков, обусловленных применением ЭМУ. Значительная неустойчивость характеристик ЭМУ из-за гистерезиса и влияния реакции якоря вынуждает вводить отрицательную связь по его напряжению, которая снижает коэффициент усиления ЭМУ и превращает его в колебательное звено, требующее сложной в наладке коррекции с помощью рассмотренных выше гибких связей. Другим недостатком схемы является необходимость использования для формирования требуемых характеристик привода переключений контактов в цепях обратных связей, снижающих надежность схемы.

Силовые магнитные усилители, обладающие более стабильными характеристиками и повышенной надежностью, в настоящее время полностью вытеснили электромашинные усилители. До разработки рассмотренной в § 3-5 унифицированной структуры замена ЭМУ магнитными усилителями не затрагивала структуры схемы управления, которая оставалась схемой с суммирующим усилителем. Характерным

примером этого может служить схема электропривода подъема экскаватора типа ЭКГ-4,6Б (рис. 3-28).

Двигатель подъема D получает питание от генератора G , имеющего две обмотки возбуждения: независимого $ОВН$ и параллельного $ОВП$. Параллельная обмотка через сопротивление $R_{д2}$ включается на выводы якоря генератора. Сопротивление ее цепи значительно больше соответствующего критическому самовозбуждению и при номинальной ЭДС обмотка $ОВП$ создает 25% суммарной МДС возбуждения генератора. Остальная МДС создается обмоткой $ОВН$, которая получает питание от силового двухтактного магнитного усилителя $УМС$, соединенного по мостовой схеме. Для этого обмотка независимого возбуждения $ОВН$ генератора разделена на две полуобмотки, включаемые в соответствующие плечи моста, два другие плеча которого образуют балластные резисторы $R_{б1}$ и $R_{б2}$. Магнитный усилитель $УМС$ имеет четыре обмотки управления, а также обмотки смещения (не показанные на схеме), которые необходимы для выставления нуля напряжения на выходе усилителя при отсутствии управляющего сигнала. Кроме того, с помощью обмоток смещения устанавливаются требуемые

значения токов холостого хода каждого из однократных магнитных усилителей, составляющих двухтактную схему. Отметим, что использование самовозбуждения генератора позволило здесь примерно на 20% снизить требуемую мощность магнитного усилителя.

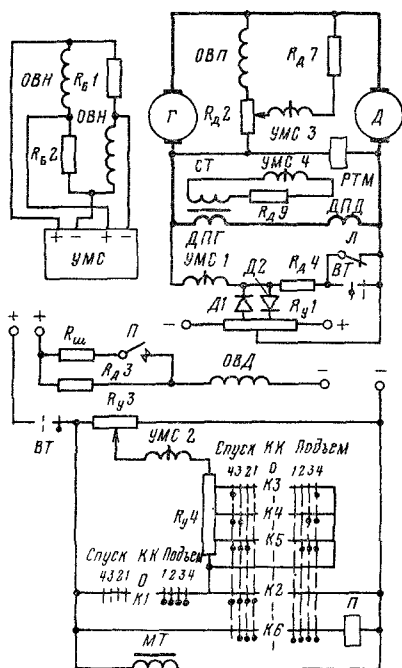


Рис. 3-28. Схема управления электроприводом подъема экскаватора типа ЭКГ-4.6Б.

Обмотка УМС3 используется для получения жесткой отрицательной обратной связи по напряжению. Так как в качестве потенциометра используется цепь параллельной обмотки, за счет ЭДС взаимной индукции, наводимой в параллельной обмотке при изменении потока, и ЭДС генератора на обмотку УМС3 воздействует также и сигнал гибкой отрицательной обратной связи по ЭДС генератора. Гибкая обратная связь по ЭДС генератора максимальна при подключении цепи обмотки УМС3 параллельно обмотке ОВП; она отсутствует, если эту цепь подключить непосредственно на напряжение генератора. Выбором положения точки подключения обмотки УМС3 на резисторе $R_{д2}$ можно получить сигнал гибкой обратной связи по напряжению генератора, оказывающий достаточное стабилизирующее действие и в то же время незначительно замедляющий протекание переходных процессов. Следует отметить, что гибкая отрицательная связь по ЭДС генератора неблагоприятно влияет на условия ограничения тока при резких stop-переходах, препятствуя интенсивному гашению поля генератора. Поэтому коэффициент гибкой обратной связи по ЭДС генератора выбирается минимально возможным по условию стабилизации системы.

Для ограничения перерегулирований и колебаний тока якоря при работе системы токоограничения в схеме предусмотрена гибкая отрицательная обратная связь по току якоря, осуществляемая обмоткой УМС4. Эта обмотка получает питание от специальной обмотки СТ, намотанной на дополнительных полюсах генератора, ЭДС которой пропорциональна производной тока якоря.

Задающая обмотка усилителя УМС2 через добавочный резистор R_{y4} и контакт командоконтроллера К1 или К2 подключается параллельно одному из участков задающего потенциометра R_{y3} . Ток, протекающий по задающей обмотке, зависит от положения рукоятки командоконтроллера КК. При перестановке рукоятки командоконтроллера в положение «Подъем» замыкается контакт К1 и задающая обмотка через резистор R_{y4} подключается к левому плечу потенциометра R_{y3} . При этом полярность задающего сигнала соответствует подъему ковша. При перестановке рукоятки командоконтроллера в положение «Спуск» замыкается контакт К2, цепь задающей обмотки подключается к правому плечу потенциометра R_{y3} . Соответственно меняется полярность задающего сигнала, привод работает в направлении спуска. Переключениями контактов командоконтроллера КК обеспечиваются четыре ступени скорости в каждом направлении. Контакты КК, обозначенные К5, К4 и К3, замыкаются последовательно при ходе рукоятки командоконтроллера от нуля в любую сторону. Тем самым последовательно выводятся участки добавочного резистора R_{y4} , задающая МДС увеличивается от минимального значения, соответствующего первой скорости, до максимального значения, соответствующего основной, четвертой скорости привода. Статические характеристики электропривода подъема экскаватора типа ЭКГ-4,6Б показаны на рис. 3-29.

При работе на спуск в четвертом положении командоконтроллера размыкается контакт К6 (рис. 3-28). При этом отключается контактор П, в цепи обмотки возбуждения двигателя ОВД увеличивается доба-

вочное сопротивление, поле двигателя подъема ослабляется и скорость спуска увеличивается (характеристика 4с на рис. 3-29). При переводе рукоятки контроллера в положение 3 («Спуск») контакт К6 замыкается и поток двигателя вновь принимает номинальное значение (характеристика 3с на рис. 3-29).

Характеристика 0 на рис. 3-29, соответствующая нулевому положению командоконтроллера, предназначена для осуществления режима удержания ковша без наложения механического тормоза. Относительно малая скорость спуска в режиме удержания ковша обеспечивается

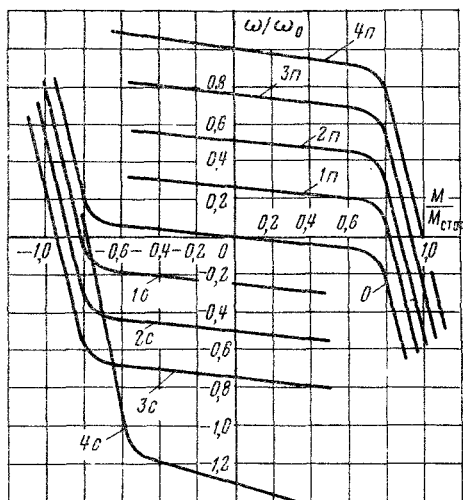


Рис. 3-29. Статические характеристики электропривода подъема экскаватора типа ЭКГ-4,6Б.

в данной схеме за счет исключения действия обратной связи по току вплоть до нагрузок, соответствующих току отсечки (который больше тока статической нагрузки, определяемой весом груженого ковша), и выбора необходимого коэффициента отрицательной связи по напряжению. Однако следует отметить, что возможности увеличения жесткости характеристики удержания в рассматриваемой схеме довольно ограничены из-за невысокого общего коэффициента усиления системы.

На рис. 3-30, а, б представлены два вспомогательных узла схемы управления экскаватором типа ЭКГ-4,6Б.

На рис. 3-30, а показаны силовая цепь и цепь управления двигателем ДК открывания днища ковша. Двигатель ДК, имеющий смешанное возбуждение, подключается к сети 110 В автоматом В1 через добавочный резистор R. Сопротивление резистора R значительно, что обеспечивает небольшой пусковой момент, достаточный для систематического выбора слабину троса, связанного с зашелкой днища ковша,

при любых рабочих перемещениях рукояти. Для открывания днища машинист нажимает кнопку *КОД*, после чего срабатывает контактор *КД* и выводит большую часть сопротивления резистора *R*. При этом ток якоря двигателя и его момент во много раз возрастают, трос выдергивает защелку и днище ковша открывается.

При эксплуатации экскаваторных приводов температура машин изменяется в весьма широких пределах как за счет изменений температуры окружающей среды, так и за счет нагрева при работе и охлаждения во время пауз. Изменения температуры обмоток вызывают изменения их сопротивления, поэтому сигнал на входе узла отрицательной связи по току при прочих равных условиях зависит от температуры обмоток, с которых он снимается. Это вызывает изменения установленного стопорного тока привода тем более значительные, чем в более широких пределах изменяется температура.

Бортовая сеть постоянного тока питается от генератора собственных нужд *ГСН*. При нерегулируемом добавочном сопротивлении в цепи обмотки независимого возбуждения *ГСН* вследствие температурных изменений сопротивления обмотки возбуждения у холодной машины зимой напряжение будет на 5—10% выше, а у нагретой летом на 5—10% ниже номинального. Это дополнительный фактор, вызывающий изменения стопорных токов.

Если не принимать специальных мер, стопорный ток при холодных машинах зимой может оказаться на 50—70% выше, чем при нагретых машинах летом. Стопорный момент привода при этом будет изменяться в еще более широких пределах, так как вследствие температурных изменений сопротивления обмоток возбуждения двигателей их ток возбуждения и поток при холодных машинах будет больше, чем при нагретых.

В схемах, где специальные средства температурной компенсации отсутствуют, при эксплуатации напряжение *ГСН* систематически контролируется и поддерживается постоянным вручную экипажем машины, а некоторое уменьшение пределов изменения стопорного момента достигается сезонной переналадкой приводов. Однако температурные изменения стопорных токов и моментов в этих условиях остаются значительными и для их уменьшения в новых схемах экскаваторного привода предусматриваются специальные устройства температурной компенсации.

В рассматриваемой схеме частичная компенсация изменений стопорных токов достигается регулированием напряжения *ГСН* в зависимости от температуры его обмотки независимого возбуждения *ОВ1* (рис. 3-30, б). Для питания обмотки возбуждения *ОВ1* используется трехфазный магнитный усилитель *МУТК*, задающая обмотка которого *ОУ1* включена на падение напряжения в обмотке возбуждения *ОВ1*, а обмотка *ОУ3* осуществляет жесткую положительную обратную связь по напряжению *ГСН*.

Обмотки усилителя *ОУ2* и *ОУ4* замкнуты накоротко с целью демпфирования резких возмущений, возникающих при изменении нагрузки возбудителя, особенно при включении двигателя открывания ковша. Для уменьшения влияния колебаний напряжения сети перемен-

ного тока в усилителе МУТК не предусмотрена внутренняя обратная связь по току. При этом усилитель работает как регулятор тока и при неизменном сигнале на входе и изменениях напряжения сети переменного тока стремится поддерживать ток возбуждения постоянным.

При изменениях температуры обмотки ОВ1 изменяется ее сопротивление и, следовательно, задающий сигнал. Поэтому по мере нагрева возбuditеля его напряжение возрастает, частично компенсируя возникающее по мере нагрева главных машин уменьшение стопорного момента, и наоборот.

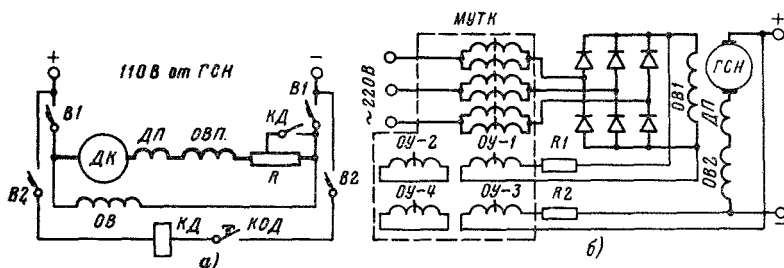


Рис. 3-30. Узел управления двигателем открывания днища ковша (а) и узел температурной компенсации (б).

В рассмотренной схеме сохраняются все недостатки, присущие структуре с суммирующим усилителем. Ее главным достоинством по сравнению со схемой с ЭМУ является более высокая надежность. Однако быстродействие схемы, возможности формирования статических характеристик и динамические свойства электропривода с такой схемой управления не могут полностью удовлетворить сформулированным выше требованиям. Поэтому в настоящее время основной структурой экскаваторного электропривода является двухконтурная структура подчиненного регулирования (см. рис. 3-24) в различных реализациях, рассматриваемых в следующем параграфе.

3.7. ПРИМЕРЫ СХЕМ ЭКСКАВАТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВодОВ СО СТРУКТУРОЙ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

На выпускаемых в настоящее время экскаваторах-драглайнах широко используется система Г — Д с критическим самовозбуждением генератора, управляемая посредством силовых магнитных усилителей. Принципиальная схема такой системы для электропривода поворота имеет вид показанной на рис. 3-31. Здесь двигатель Д получает питание от генератора Г, параллельная обмотка которого ОВ1 осуществляет критическое самовозбуждение генератора, а обмотка независимого возбуждения ОВН включена на выход силового магнитного

усилителя МУ по мостовой схеме, аналогичной рассмотренной на рис. 3-28. Характеристика холостого хода генератора с критическим самовозбуждением представлена на рис. 3-32, а. Если не учитывать гистерезиса и влияния падения напряжения в якоре на цепь самовозбуждения, генератор с критическим самовозбуждением при ненасыщенной магнитной цепи имеет бесконечно большой коэффициент усиления, а его переходные процессы описываются дифференциальным уравнением

$$u_B = \frac{R_H T_r}{w_H k_B} \frac{de_r}{dt} = \frac{T_r}{k_r} \frac{de_r}{dt}, \quad (3-22)$$

где u_B — напряжение на независимой обмотке возбуждения;

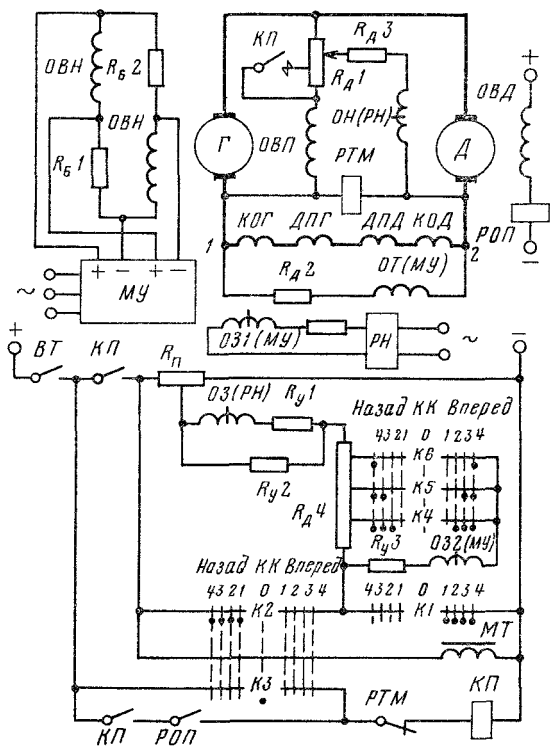


Рис. 3-31. Схема электропривода по системе Г — Д с критическим самовозбуждением генератора.

R_H, w_H — полное сопротивление и число витков на полюс обмотки независимого возбуждения;

T_r — суммарная постоянная времени возбуждения генератора;

$$k_B = de_r/dF_r; \quad k_r = de_r/du_B = k_B w_H / R_H;$$

F_r — результирующая МДС возбуждения генератора.

Соответственно передаточная функция генератора при критическом самовозбуждении имеет вид:

$$W_r = \frac{e_r(p)}{u_B(p)} = \frac{k_r}{p T_r} = \frac{1}{p T_H}. \quad (3-23)$$

Таким образом, при принятых допущениях генератор с критическим самовозбуждением представляет собой интегрирующее

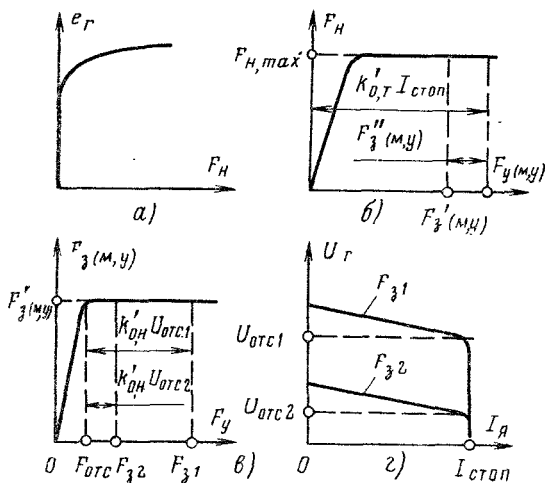


Рис. 3-32. Характеристики элементов схемы на рис. 3-31.

звено с постоянной интегрирования T_H , зависящей от постоянной времени генератора T_r и его коэффициента усиления. Из (3-22) также следует, что при постоянном напряжении u_B ЭДС генератора с критическим самовозбуждением нарастает линейно с $de_r/dt = \text{const}$ до тех пор, пока не наступит насыщение его магнитной цепи. При этом процесс пуска двигателя протекает на основной части равномерно ускоренно, что является важным преимуществом использования генератора с критическим самовозбуждением.

Характеристика силового магнитного усилителя МУ $F_H = f(F_{y(m,y)})$, где F_H — МДС обмотки $ОВН$, $F_{y(m,y)}$ — результирующая МДС управления МУ, представлена на рис. 3-32, б. Обмотка $ОТ$ (МУ) включена через добавочный резистор $R_{д2}$ на падение напряжения на участке 1 — 2 якорной цепи и осуществляет непрерывную отрицательную обратную связь по току якоря, обеспечивающую ограничение момента привода во всех режимах. Обмотка $ОЗ1$ (МУ) получает питание от регулятора напряжения $РН$, функции которого в данной схеме выполняет дополнительный магнитный усилитель, который имеет нелинейную характеристику $F_{з(m,y)} = f(F_y)$, представленную на рис. 3-32, в.

Регулятор напряжения $РН$ в данной схеме имеет две обмотки управления: задающую $ОЗ$ ($РН$), с помощью которой и осуществляется управление электроприводом, и обмотку непрерывной отрицательной связи по напряжению генератора $ОН$ ($РН$), которая служит для поддержания постоянства напряжения генератора в пределах жесткого рабочего участка механических характеристик. Уравнение баланса МДС на входе регулятора напряжения $РН$ имеет вид:

$$F_y = F_z - F_{о,н} = F_z - k'_{о,н} U_{г},$$

где $k'_{о,н} = F_{о,н}/U_{г}$.

Зададимся значением $F_z = F_{з1}$, соответствующим глубокому насыщению $РН$, и обозначим результирующую МДС, соответствующую переходу от линейного участка к насыщенному, $F_{отс}$. При $F_y < F_{отс}$ $РН$ работает на линейном рабочем участке своей характеристики, а при $F_y > F_{отс}$ насыщен и его выходная величина при изменениях F_y остается постоянной, поэтому действие отрицательной связи по напряжению на силовом усилителе здесь не передается — имеет место отсечка по напряжению. Напряжение генератора, соответствующее $F_{отс}$, зависит от задающей МДС

$$U_{отс} = (F_z - F_{отс})/k'_{о,н}. \quad (3-24)$$

При $U_{г} < U_{отс}$ регулятор $РН$ обеспечивает постоянную задающую МДС силового усилителя $F'_{з(m,y)}$. При ненасыщенном генераторе для получения любой ЭДС $F_H = 0$, следовательно, в этих пределах $F_{y(m,y)} = 0$, и уравнение баланса МДС можно записать так [пока действие обмотки $ОЗ2$ (МУ) не учитываем]

$$F'_{з(m,y)} - F_{о,т} = F'_{з(m,y)} - k'_{о,т} I_{я} = 0,$$

где $k'_{о,т} = F_{о,т}/I_{я}$.

Следовательно, при $U_{\Gamma} < U_{отс}$ и ненасыщенном генераторе схема поддерживает ток постоянным и равным заданному стопорному значению:

$$I_{я} = F'_{3(m,y)} / k'_{0,\Gamma} = F'_{3(m,y)} R_{0,\Gamma} \Sigma / R_{\Gamma} w_{0,\Gamma} = I_{стоп}. \quad (3-25)$$

На рис. 3-32, з в соответствии с (3-25) построен вертикально падающий участок внешней характеристики генератора при $U_{\Gamma} < U_{отс}$. При $U_{\Gamma} > U_{отс}$ регулятор напряжения переходит на линейный участок своей характеристики и отрицательная связь по напряжению здесь стремится поддерживать напряжение генератора постоянным, чем обеспечивается жесткий участок внешней характеристики ($U_{\Gamma} > U_{отс}$ на рис. 3-32, з). В соответствии с (3-24) уменьшение задающей МДС регулятора $RH F_3$ уменьшает напряжение отсечки и напряжение холостого хода генератора (характеристика при $U_{\Gamma} > U_{отс2}$, $F_3 = F_{32}$ на рис. 3-32, з). Если при этом F_{32} остается больше $F_{отс}$, стопорный ток привода в соответствии с (3-25) остается неизменным.

Как по возможностям формирования статических характеристик, так и по основным динамическим свойствам рассматриваемая схема подчиненного регулирования тока и напряжения генератора аналогична унифицированной структуре экскаваторного электропривода, приведенной на рис. 3-24. Для того чтобы в этом убедиться, необходимо проанализировать свойства рассматриваемой схемы в указанных выше режимах короткого замыкания и холостого хода и сопоставить результаты с приведенными для унифицированной структуры в § 3-5.

Если принять, что силовой магнитный усилитель может быть в динамике представлен инерционным звеном с постоянной времени $T_{м,у}$ и коэффициентом усиления $k_{м,у}$, а также воспользоваться передаточной функцией генератора с критическим самовозбуждением (3-23), структурную схему прямого канала регулирования тока в опыте короткого замыкания ($\omega \equiv 0$) можно представить в виде, показанном на рис. 3-33, а. Цепь обратной связи по току на этом рисунке учитывает наличие индуктивности рассеяния обмоток дополнительных полюсов и компенсационной обмотки. При этом сигнал $u_{0,\Gamma}$, снимаемый с этого участка якорной цепи, можно представить в виде

$$u_{0,\Gamma} = R_{\Gamma} i_{я} + L_{\Gamma} \frac{di_{я}}{dt} = R_{\Gamma} \left(i_{я} + T_{\Gamma} \frac{di_{я}}{dt} \right), \quad (3-26)$$

где R_{Γ} , L_{Γ} — сопротивление и индуктивность участка якорной цепи, с которого снимается сигнал обратной связи по току;

$T_T = L_T/R_T$ — постоянная времени, определяемая параметрами этого участка.

При составлении структурной схемы на рис. 3-33, а сигнал $u_{0,T}$ приведен к параметрам задающей обмотки силового магнитного усилителя:

$$u'_{0,T} = k_{0,T}(1 + T_T p)i_{я}, \quad (3-27)$$

где

$$k_{0,T} = R_T \frac{R_{0,3,\Sigma}}{R_{0,T,\Sigma}} \frac{w_{0,T}}{w_{0,3}};$$

$$u'_{0,T} = u_{0,T} \frac{R_{0,3,\Sigma}}{R_{0,T,\Sigma}} \frac{w_{0,T}}{w_{0,3}};$$

$R_{0,3,\Sigma}$, $R_{0,T,\Sigma}$, $w_{0,3}$, $w_{0,T}$ — суммарные сопротивления и числа витков соответственно задающей и токовой обмоток магнитного усилителя МУ.

Передаточная функция разомкнутого контура тока имеет вид:

$$W_{раз, T} = \frac{k_{M,y}}{R_{я,\Sigma} T_{иp} (T_{M,y} p + 1) (T_{яp} + 1)}. \quad (3-28)$$

При реализации унифицированной структуры на элементах УБСР имеется возможность компенсации больших и средних постоянных времени. В частности, в данном случае при использовании последовательной коррекции следовало бы компенсировать постоянную $T_{я}$, значения которой для экскаваторных электроприводов лежат в пределах $T_{я} = 0,02 \div 0,1$ с. Однако в рассматриваемой схеме невысокий коэффициент усиления силового магнитного усилителя затрудняет формирование требуемых передаточных функций регулятора. Более того, сам силовой магнитный усилитель обладает значительной электромагнитной инерцией. Для снижения постоянной времени $T_{M,y}$ в цепь каждой его обмотки управления вводятся большие добавочные сопротивления, что существенно увеличивает и без того значительную мощность управления усилителем. Поэтому при приемлемом коэффициенте усиления реальные значения $T_{M,y}$ лежат в пределах $0,07 - 0,1$ с.

Из изложенного ясно, что в рассматриваемой схеме постоянные $T_{M,y}$ и $T_{я}$ являются некомпенсируемыми постоянными контура регулирования, причем каждая из них имеет повышенное значение. Приведенные оценки постоянных $T_{M,y}$ и $T_{я}$ позво-

ляют заключить, что в данном случае достаточно достоверной мерой некомпенсируемых инерционностей контура может служить $T_{\mu} = T_{м,у} + T_{я} \geq 0,1$ с.

Следует заметить, что высокий уровень T_{μ} не является препятствием к получению хорошего качества динамических процессов, которое определяется только постоянной времени интегрирования T_0 и уровнем некомпенсируемых инерционностей T_{μ} контура, т. е. величиной $a = T_0/T_{\mu}$. Однако, как было отмечено в § 2-8, значение T_{μ} при данном a определяет быстродействие контура регулирования, поэтому при традиционной последовательной коррекции стремятся к получению возможно меньших значений T_{μ} .

В унифицированной структуре экскаваторного электропривода возможно получение высокого быстродействия при требуемом качестве за счет введения гибкой связи по регулируемой переменной. В данной схеме в соответствии с (3-27) сигнал обратной связи по току содержит гибкую составляющую, характеризующуюся постоянной времени T_T . При $T_{\mu} = T_{м,у} + T_{я}$ передаточная функция разомкнутого контура регулирования тока

$$W_{раз,т} = \frac{1/k_{0,т}}{T_{0,т}p(T_{\mu}p + 1)}, \quad (3-29)$$

где $T_{0,т} = T_{и} \frac{R_{я, \Sigma}}{k_{м,у}k_{0,т}}$.

Соответствующая структурная схема контура тока показана на рис. 3-33, б. Передаточная функция замкнутого контура с учетом гибкой составляющей сигнала обратной связи может быть представлена в виде

$$W_{зам,т} = \frac{1/k_{0,т}}{T_{0,т}T_{\mu}p^2 + (T_{0,т} + T_T)p + 1}. \quad (3-30)$$

Сравнение (3-29) с (2-68) обнаруживает их полную аналогию. Однако в данном случае желаемая передаточная функция $W_{раз,т}$ получена не с помощью последовательной коррекции за счет введения регулятора с требуемой передаточной функцией, а путем использования формирующей положительной связи по напряжению генератора, обеспечивающей его критическое самовозбуждение. Далее, сравнивая разомкнутую цепь контура регулирования тока на рис. 3-25, а с аналогичной цепью на рис. 3-33, б, можно установить, что они идентичны: в данной схеме магнитный усилитель МУ выполняет функции звена ограничения ЗО, генератор Г играет роль интегрального регулятора тока, а вместо малой инерционности преобразователя $T_{п}$ фигурирует инерционность магнитного усилителя $T_{м,у}$. Сопоставление

передаточной функции замкнутого контура тока (3-30) с соответствующим выражением для унифицированной структуры (3-18) также свидетельствует об их полной аналогии, причем в данной схеме это совпадение обеспечивается наличием индуктивности рассеяния обмоток дополнительных полюсов и компенсационных обмоток, с которых снимается сигнал токовой связи.

Из изложенного следует, что динамические свойства контура регулирования тока в схеме Г — Д с критическим самовозбуждением генератора и возможности формирования требуемых переходных процессов и статических характеристик вполне аналогичны рассмотренным в § 2-8 для системы с последовательной коррекцией и в § 3-5 для унифицированной структуры экскаваторного электропривода. Рассмотренный в § 3-5 простейший метод расчета параметров контура тока унифицированной структуры при принятых допущениях справедлив и для контура регулирования тока в данной схеме.

Определим установившуюся ошибку регулирования тока в данной схеме в режиме стопорения, принимая, что скорость двигателя снижается по линейному закону с максимальным ускорением $\varepsilon_{\max}$

$$\omega = \omega_{\text{нач}} - \varepsilon_{\max} t \neq \omega_{\text{нач}} - \varepsilon_{\max} / p. \quad (3-31)$$

Ошибка регулирования тока $\Delta i_{\text{я,стоп}}$ в этом режиме обусловлена влиянием внутренней связи по ЭДС двигателя, которое можно учесть введением возмущения $c\omega$ на вход звена якорной цепи двигателя (рис. 3-33, а).

Чтобы воспользоваться общей формулой ошибки регулирования по возмущению [4], необходимо преобразовать структурную схему на рис. 3-33, а к схеме с единичной обратной связью по току, введя $k_{\text{от}}(1 + pT_T)$ в прямой канал регулирования, а обратную величину — на вход задания тока. После преобразований получим:

$$\Delta i_{\text{я,стоп}} = \frac{c}{R_{\text{я},\Sigma}} \frac{pT_{\text{о,т}}(1 + T_{\text{м,у}}p)}{1 + p(T_{\text{о,т}} + T_T) + p^2T_{\text{о,т}}T_{\mu}} \omega(p), \quad (3-32)$$

или с учетом (3-31)

$$\Delta i_{\text{я,стоп}} = \frac{c}{R_{\text{я},\Sigma}} \frac{(\omega_{\text{нач}} - \varepsilon_{\max}/p) pT_{\text{о,т}}(1 + T_{\text{м,у}}p)}{1 + p(T_{\text{о,т}} + T_T) + p^2T_{\text{о,т}}T_{\mu}}. \quad (3-33)$$

Установившаяся ошибка в динамическом процессе снижения скорости определяется из (3-33) при $p = 0$:

$$\Delta i_{\text{я,стоп,макс}} = - \frac{cT_{\text{о,т}}\varepsilon_{\max}}{R_{\text{я},\Sigma}} = - \frac{ca_{\text{т,доп}}T_{\mu}}{R_{\text{я},\Sigma}} \varepsilon_{\max}. \quad (3-34)$$

Знак минус в (3-34) свидетельствует, что при стопорениях в данной схеме ток должен превышать значение $I_{\text{стоп}}$, причем выброс тока тем больше, чем быстрее снижается скорость и чем больше $T_{0,T}$. Выражение (3-34) справедливо только при работе магнитного усилителя в пределах линейной части его характеристики (рис. 3-32, б). Если в процессе стопорения магнитный усилитель насыщается, цепь воздействия обратной связи по току разрывается и выбросы тока за стопорное значение

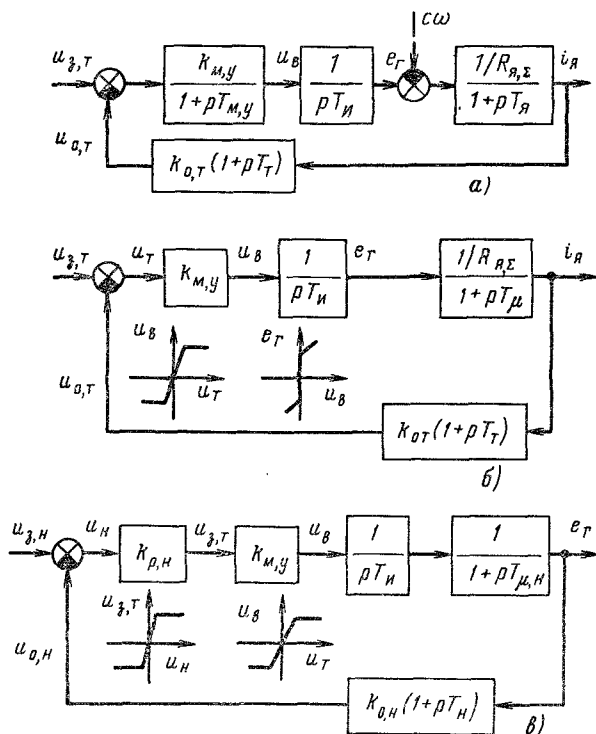


Рис. 3-33. Структурные схемы экскаваторного электропривода по системе Г – Д с критическим самовозбуждением генератора.

возрастают по сравнению с определяемыми по (3-34). Поэтому максимальное напряжение возбудителя для электроприводов копающих механизмов (тяга экскаватора драглайна, подъем и напор лопаты) должно выбираться с учетом вероятного при стопорениях темпа снижения скорости. Для электроприводов подъемной лебедки драглайна и механизмов поворота макси-

мальное напряжение магнитного усилителя МУ определяется допустимым ускорением $\epsilon_{\text{доп}}$ по условиям ограничения динамических нагрузок механического оборудования в процессах пуска и торможения (см. гл. 2). Требуемое максимальное значение напряжения магнитного усилителя может быть определено по (3-16), если принять в ней $k_{\text{п}} = 1$ и подставить значение $T_{\text{и}} = T_{\text{г}}/k_{\text{г}}$.

Обмотка отрицательной связи по напряжению генератора $ОН (РН)$ получает питание от потенциометра, образуемого последовательным соединением параллельной обмотки генератора $ОВП$ и добавочного сопротивления $R_{\text{д}1}$ в этой цепи. Такая же схема включения обмотки отрицательной связи по напряжению генератора была рассмотрена в схеме, представленной на рис. 3-28, и было установлено, что благодаря наводимой в обмотке $ОВП$ ЭДС взаимной индукции в сигнале жесткой связи по ЭДС генератора содержится составляющая гибкой связи. Это дает основание записать:

$$u_{\text{о,н}} = k_{\text{о,н}}(1 + T_{\text{н}p})e_{\text{г}}. \quad (3-35)$$

Здесь напряжение $u_{\text{о,н}}$, коэффициент обратной связи $k_{\text{о,н}}$ и постоянная гибкой связи $T_{\text{н}}$ приведены к параметрам задающей обмотки регулятора напряжения, причем значения $k_{\text{о,н}}$ и $T_{\text{н}}$ могут изменяться перемещением точки подсоединения обмотки $ОН (РН)$ к резистору $R_{\text{д}1}$. Если постоянные времени силового магнитного усилителя $T_{\text{м,у}}$ и регулятора напряжения $T_{\text{р,н}}$ отнести к некомпенсируемым, т. е. принять $T_{\text{м,н}} = T_{\text{м,у}} + T_{\text{р,н}}$, структурную схему контура регулирования напряжения в режиме холостого хода можно представить в виде, показанном на рис. 3-33, в. В соответствии с этой схемой передаточная функция разомкнутого контура регулирования напряжения в рассматриваемом режиме имеет вид:

$$W_{\text{раз,н}} = \frac{1/k_{\text{о,н}}}{T_{\text{о,н}p}(T_{\text{м,н}p} + 1)}, \quad (3-36)$$

где $T_{\text{о,н}} = T_{\text{н}}/k_{\text{р,н}}k_{\text{м,у}}k_{\text{о,н}}$.

Передаточная функция замкнутого контура регулирования напряжения при $i_{\text{я}} = 0$ имеет вид:

$$W_{\text{зам,н}} = \frac{1/k_{\text{о,н}}}{T_{\text{о,н}}T_{\text{м,н}p^2 + (T_{\text{о,н}} + T_{\text{н}})p + 1}}. \quad (3-37)$$

Сравнивая структурную схему на рис. 3-33, в и (3-37) со структурной схемой на рис. 3-25, б и с (3-21), можно убедиться, что соответствие данной схемы унифицированной структуре экс-

каваторного электропривода является полным и в режиме холостого хода. Рассмотрим, от каких факторов зависит жесткость рабочего участка характеристик электропривода, показанных на рис. 3-32, г. Как ясно из приведенного выше анализа работы схемы, при статических режимах в пределах рабочего участка механических характеристик привода возбудитель и регулятор напряжения не насыщены и работают с коэффициентами усиления $k_{м,у}$ и $k_{р,н}$. Если дополнить схему на рис. 3-31 положительной связью по току якоря, действующей на вход РН и принять, что генератор также работает на ненасыщенной части своей характеристики (см. рис. 3-32, а), где его коэффициент усиления равен бесконечности, можно записать:

$$k_{р,н}U_{з,н} - k_{о,н}k_{р,н}u_{дв} - (k_{о,т} - k_{п,т}k_{р,н})I_{я} = 0, \quad (3-38)$$

где $u_{дв} = \omega + i_{я}R_{я}$ — напряжение на выводах якоря двигателя,
 $R_{я}$ — сопротивление якоря двигателя;
 $k_{п,т}$ — коэффициент положительной связи по току

Подставив выражение $u_{дв}$ в (3-38) и разрешив полученное уравнение относительно скорости, получим уравнение электро-механической характеристики:

$$\omega = \frac{U_{з,н}}{k_{о,нс}} - \frac{k_{о,т}/k_{р,н} - k_{п,т} + R_{я}}{k_{о,нс}} i_{я}. \quad (3-39)$$

Уравнение механической характеристики, соответствующее рабочему участку экскаваторных характеристик:

$$\omega = \omega_0 - M_{ст}/\beta_{зам}, \quad (3-40)$$

где $\omega_0 = U_{з,н}/k_{о,нс}$ — скорость идеального холостого хода;

$\beta_{зам} = \frac{c^2 k_{о,н}}{k_{о,т}/k_{р,н} - k_{п,т} + R_{я}}$ — модуль жесткости статической характеристики привода при замкнутой системе регулирования напряжения на двигателе.

Полученные соотношения свидетельствуют о том, что в рассматриваемой схеме жесткость рабочего участка механической характеристики может быть получена практически любой выбором соответствующего коэффициента положительной связи по току якоря $k_{п,т}$. Для электропривода поворота (см. рис. 3-31), статические нагрузки которого невелики, а для эффективного демпфирования колебаний ковша после выхода на установившуюся скорость необходима пониженная жесткость рабочего участка механической характеристики (см. § 2-4), положительная обратная связь по току обычно не предусматри-

вается. Для электроприводов подъема и тяги необходима высокая жесткость рабочего участка механической характеристики. Практически для этих приводов устанавливается критическая положительная связь по току с коэффициентом $k_{п,т,кр} = k_{о,т}/k_{р,н}$. При этом электромеханическая характеристика привода имеет вид:

$$\omega = \omega_0 - \frac{R_{я}}{c} I_{я},$$

а модуль жесткости механической характеристики в замкнутой системе $\beta_{зам} = c^2/R_{я\Sigma}$, т. е. совпадает с модулем жесткости естественной характеристики двигателя в разомкнутой системе при $u_{дв} = \text{const}$. Выбором $k_{п,т} > k_{п,т,кр}$ можно получить и более высокую жесткость, однако при этом динамические качества контура регулирования напряжения (перерегулирование, колебательность) могут ухудшаться. Это связано с выбранными условиями оптимизации параметров контура регулирования напряжения, соответствующими режиму холостого хода. При $k_{п,т} = k_{п,т,кр} = k_{о,т}/k_{р,н}$ действие отрицательной связи по току компенсируется противоположным и равным действием положительной связи по току. Система регулирования при этом работает примерно так же, как и в режиме холостого хода. Выбор более сильной положительной связи по току вызывает существенные отклонения от режима, по которому выбирались параметры контура, что и может привести к ухудшению динамики системы, особенно при $T_{р,н} \neq 0$.

Следует учитывать, что в данной схеме на точности регулирования напряжения может сказываться явление гистерезиса в магнитной цепи генератора, а при работе на основной характеристике — насыщение этой цепи. Однако благодаря сильной отрицательной связи по напряжению генератора влияние этих факторов невелико.

Для электроприводов поворота желательно предусматривать регулирование стопорного тока в диапазоне до 2:1, что позволяет машинисту ограничивать раскачивание ковша при пусках и торможениях (см. § 2-4). В данной схеме для этой цели предусмотрена дополнительная задающая обмотка силового магнитного усилителя ОЗ2 (МУ). Эта обмотка включена в цепь обмотки задания напряжения ОЗ (РН), поэтому переключения контактов контроллера в этой цепи вызывают одновременно и изменения МДС обмотки ОЗ2 (МУ) $F'_{3,т}$. С учетом этой МДС равенство (3-25) запишется так:

$$I_{я} = I_{\text{стоп}} = \frac{(F'_{3,т} + F''_{3,т})R_{о,т,\Sigma}}{R_{т\omega_{о,т}}} \quad (3-41)$$

Совместным действием всех обмоток обеспечивается получение семейства механических характеристик, представленных на рис. 3-34. Характеристики соответствуют требованиям, предъявляемым к электроприводам поворота. Для электроприводов подъема и тяги предусматривается, как отмечено выше, более высокая жесткость рабочего участка. Для электропривода тяги, где желательно меньшее заполнение экскаваторной характеристики [$k_{отг} \approx 0,8$; см. § 2-6], сопротивление $R_{д1}$ в цепи ОВП выбирается большим критического значения. При этом генератор обладает конечным коэффициентом усиления, вследствие чего

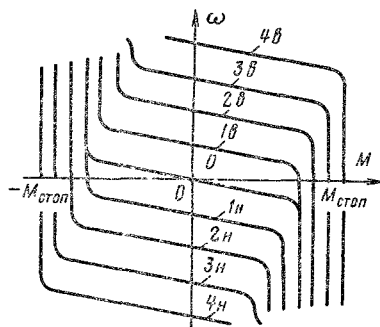


Рис. 3-34. Механические характеристики электропривода поворота по схеме на рис. 3-31.

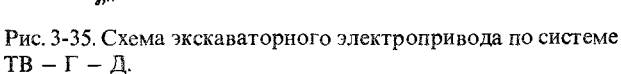
крутизна участка ограничения момента уменьшается. В некоторых случаях аналогичный эффект достигается введением на вход МУ слабой отрицательной обратной связи по напряжению генератора.

В схеме предусматривается компенсация температурных изменений стопорных токов. С этой целью резистор $R_{д2}$ изготавливается из никелевой проволоки, обладающей температурным коэффициентом сопротивления, в полтора раза превышающим температурный коэффициент сопротивления меди. Это сопротивление помещается в поток нагретого воздуха, выходящего из генератора. Поэтому при нагреве машин или изменении температуры окружающей среды меняется температура и сопротивление резистора $R_{д2}$. Из (3-41) следует, что если при изменениях температуры суммарное сопротивление в цепи токовой обмотки и сопротивление R_T обмоток якорной цепи будут изменяться в равной степени, то температурных изменений стопорного тока не будет. Чтобы исключить влияние колебаний напряжения питающей сети на стопорный ток, регулятор напряжения РН питают от стабилизатора напряжения СН.

В схеме не показаны цепи защиты, блокировок и ослабления поля (для подъема и тяги), которые в основном аналогичны рассмотренным в § 3-6. Контакт блокировочного контактора КП в цепи параллельной обмотки ОВП размыкается при срабатывании защит и наложении механического тормоза. При этом в цепь этой обмотки вводится дополнительное сопротив-

В настоящее время в экскаваторных электроприводах идет процесс постепенного вытеснения силовых магнитных усилителей тиристорными возбудителями (ТВ), обладающими при значительной требуемой мощности, измеряемой десятками киловатт, лучшими массогабаритными показателями, более высоким коэффициентом усиления и быстродействием.

КОДЗ ДПДЗ



177

будителя получает питание от регулятора напряжения РН, функции которого выполняет реверсивный магнитный усилитель, аналогично используемому в схеме на рис. 3-31. На его обмотки управления воздействуют сигналы отрицательной связи по напряжению генератора — обмотка ОН (РН), положительной связи по току — обмотка ОТ (РН), гибкой отрицательной связи по ЭДС генератора — обмотка ОГ (РН), а также сигнал задания напряжения — обмотка ОЗ (РН).

Главным отличием схемы является введение формирующей положительной связи по напряжению генератора не за счет само-

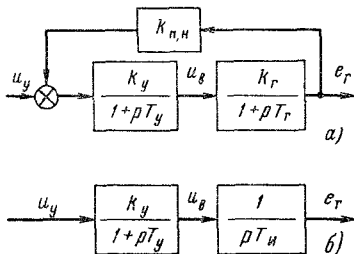


Рис. 3-36. Структурные схемы узла возбудитель — генератор.

возбуждения генератора, а путем воздействия на цепь управления возбудителя. Структурная схема возбудителя и генератора с независимым возбуждением, охваченных формирующей положительной связью по напряжению генератора, показана на рис. 3-36, а. Передаточная функция этого узла схемы, замкнутого положительной связью по напряжению генератора,

$$W_{ТВ - Г} = \frac{k_y k_r}{(T_y p + 1)(T_r p + 1) - k_y k_r k_{п,н}} \quad (3-42)$$

При критическом коэффициенте положительной связи по напряжению $k_{п,н} = 1/k_y k_r$ с учетом того, что $T_r \gg T_y$, получим

$$W_{ТВ - Г} \approx \frac{k_y k_r}{T_r p (T_y p + 1)} = \frac{k_y}{T_{иp} (T_y p + 1)} \quad (3-43)$$

Рассматривая (3-43), можно убедиться, что введением критической положительной связи по напряжению формируются те же передаточные функции возбудителя и генератора, что и в рассмотренной выше схеме с МУ. Поэтому структурные схемы контура регулирования тока в режиме короткого замыкания и контура регулирования напряжения в режиме холостого хода для данной схемы совпадают с приведенными на рис. 3-33, а и в. Соответственно данная схема, являющаяся одной из реализаций унифицированной структуры (см. рис. 3-24), обладает теми же возможностями формирования статических и динамических характеристик, что и подробно рассмотренная

схема на рис. 3-31. Несмотря на то что в этих схемах последовательная коррекция контуров не используется, для расчета их параметров в пределах совпадения структурных схем для расчетных режимов могут быть использованы соответствующие соотношения и приемы, изложенные в § 2-8 и 3-5.

Узел ТВ — Г данной схемы обладает передаточной функцией (3-43) только при ненасыщенном тиристорном возбудителе. Это принципиальное отличие рассматриваемой схемы от схемы, в которой генератор имеет критическое самовозбуждение. В режимах, когда магнитный усилитель МУ в схеме на рис. 3-31 насыщается и работает как звено ограничения ускорения, генератор благодаря критическому самовозбуждению сохраняет передаточную функцию интегрирующего звена, его ЭДС во времени изменяется в соответствии с (3-22) по линейному закону, чем обеспечивается равномерно ускоренный характер изменения скорости привода при $\varepsilon = \varepsilon_{\text{доп}}$. В схеме на рис. 3-35 при насыщении возбудителя генератор имеет передаточ-

ную функцию инерционного звена и его ЭДС при $U_b = U_{b, \text{max}} = \text{const}$ изменяется экспоненциально. Однако при больших коэффициентах форсирования $\alpha = U_{b, \text{max}}/U_{b, \text{ном}} > 2$ отличия кривой $e_r = f(t)$ от линейной зависимости незначительны. Этот факт, известный из курса теории электропривода, иллюстрируется графиками, показанными на рис. 3-37.

В заключение необходимо обратить внимание на то, что при применении на экскаваторах реверсивных ТП взамен генераторов реализация унифицированной структуры экскаваторного электропривода (см. рис. 3-24) также не представляет затруднений, особенно при использовании элементов УБСР. В настоящее время на серийных экскаваторах система ТП — Д не применяется, так как пока тиристорный электропривод совместно с фильтрокомпенсирующими устройствами, необходимыми для улучшения коэффициента мощности и снижения искажений напряжения питающей сети, имеет более высокие массогабаритные показатели, стоимость и меньшую эксплуатационную надежность, чем система Г — Д. Однако работы, имеющие целью устранение этих недостатков, в настоящее время ведутся интенсивно и в перспективе преимущества ТП как быстродействующего статического аппарата будут реализо-

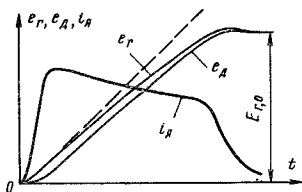


Рис. 3-37. Зависимости e_r , e_d , $i_a = f(t)$ при пуске с $u_b = U_{b, \text{max}} = \text{const}$ и $\alpha = 4$.

ваны и в тяжелых условиях работы экскаваторного электрооборудования.

В качестве примера на рис. 3-38 приведена схема управления двухдвигательным электроприводом поворота по системе ТП – Д, реализующая унифицированную структуру с помощью элементов УБСР. Здесь учтены особенности динамики инерционных механизмов, рассмотренные в § 2-5. Для наилучшего использования демпфирующей способности электроприводов при резонансных колебаниях, обусловленных кинематическими погрешностями передач электропривода, применено

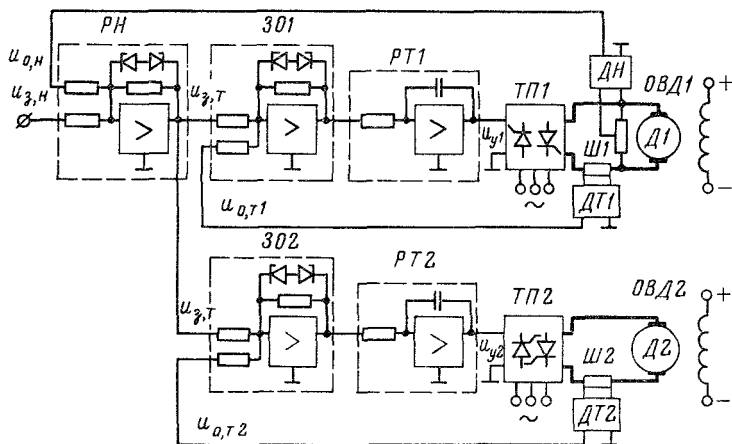


Рис. 3-38. Схема двухдвигательного электропривода поворота экскаватора по системе ТП - Д.

индивидуальное питание двигателей от реверсивных тиристорных преобразователей $ТП1$ и $ТП2$. Тиристорные преобразователи управляются индивидуальными интегральными регуляторами тока $РТ1$ и $РТ2$, на вход каждого из которых включено звено ограничения соответственно 301 или 302. При этом максимальное ускорение каждого двигателя ограничивается значением, в 2 раза большим, чем среднее ускорение при пуске с груженым ковшом у головы стрелы, т. е. при максимальном моменте инерции электропривода поворота. Такой темп нарастания ЭДС преобразователя в процессе выбора зазоров при индивидуальном питании двигателей оказывается достаточным для снижения ударов в передачах до допустимого значения. Следовательно, использование индивидуальных контуров регулирования тока обеспечивает ограничение ускорений

в период выбора зазоров и ограничение тока допустимым значением в основной части переходных процессов. Для того чтобы отрицательная связь по току не препятствовала колебаниям тока с частотой Ω_{12} , необходимым для демпфирования резонансных явлений в механической части привода, предусматривается выбор постоянной интегрирования регулятора тока, при которой на частоте Ω_{12} он выполняет функции фильтра, обеспечивающего в области частот, близких к Ω_{12} , модуль динамической жесткости механической характеристики, требуемый для оптимального демпфирования упругих колебаний [4].

Для того чтобы обеспечить равномерное распределение нагрузок между двигателями при работе на установившейся скорости, в данной схеме контур регулирования напряжения предусмотрен только для одного ТП — регулятор РН. Этот регулятор вырабатывает на выходе задание тока якоря $i_{3,т}$, которое подается на каждый индивидуальный канал регулирования тока. Общее задание тока якоря при ненасыщенных ТП и обеспечивает равенство средних статических нагрузок валопроводов.

В остальном данная схема аналогична рассмотренным выше схемам, имеющим унифицированную структуру подчиненного регулирования тока и напряжения.

Глава четвертая

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТИПОВЫХ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Автоматизация рабочего цикла механизмов циклического (прерывистого) действия исключает человека-оператора из процесса управления машиной, что влечет за собой значительное повышение требований, предъявляемых к электроприводу. Несмотря на большое разнообразие конкретных общепромышленных установок циклического действия и наличие определенных конструктивных и технологических особенностей, их механизмы относятся к классу позиционных механизмов и имеют однотипный цикл. Элементарный цикл работы позиционного механизма всегда представляет собой перемещение рабочего органа машины или приводимого в движение звена

системы из исходной позиции в заданную с требуемой точностью. Поэтому задача автоматизации перемещений позиционных механизмов может рассматриваться в общем виде, однако по постановке задачи автоматизации такие механизмы следует разделить на две группы.

К первой группе относятся позиционные механизмы, которые по технологическим условиям в процессе работы должны занимать конечное число фиксированных положений. Простейшим примером может служить двухконцевой скиповый шахтный подъемник, обслуживающий один горизонт шахты. Каждый цикл работы такого подъемника состоит из подъема груженого скипа, одновременно с которым вторым концом каната осуществляется спуск порожнего скипа, и паузы при погрузочно-разгрузочных операциях. Такой цикл многократно повторяется по командам, которые при комплексной автоматизации подъемно-транспортных операций поступают в схему автоматического управления подъемником из общей схемы управления технологическим процессом, а в других случаях даются оператором. Более сложными примерами являются пассажирский лифт, установленный в многоэтажном здании, кран специального назначения, обслуживающий конечное число пунктов на территории цеха, промышленный робот, работающий по жесткой программе, настраиваемый на выполнение требуемой операции установкой упоров, определяющих необходимые перемещения его механизмов и др.

Во всех этих случаях отдельные циклы могут отличаться друг от друга исходными и конечными положениями рабочего органа механизма, его загрузкой, длительностью периодов работы и пауз. Однако в технологическом отношении все циклы однотипны и состоят из одних и тех же этапов работы электропривода: пуск из фиксированной исходной позиции, перемещение механизма на заданное расстояние, торможение и установка рабочего органа в заданную фиксированную позицию с требуемой точностью. Определенность цикла и операций управления электроприводом для его выполнения, а также фиксированность возможных исходных и конечных позиций и являются характерными признаками рассматриваемой постановки задачи автоматизации, которую в связи с этим можно назвать *цикловой автоматизацией*, а соответствующие системы автоматического управления положением исполнительного органа называют *цикловыми*.

Вторую по условию автоматизации группу позиционных механизмов составляют механизмы установок, предназначенных для обслуживания любой точки в рабочей зоне про-

странства, плоскости или линии. Примерами таких условий автоматизации могут и здесь служить механизмы, указанные для первой группы, но в тех случаях, когда число рабочих позиций по каждой координате становится настолько большим, что нет смысла их фиксировать, а возникает необходимость постоянного контроля текущего положения каждого механизма и автоматической отработки любых дозированных перемещений в рабочей зоне. Контроль текущего положения механизма может быть либо непрерывным, либо дискретным (цифровым), а при применении шаговых двигателей текущее положение может контролироваться счетом числа шагов привода, совершенных от принятой точки отсчета. Таким образом, при второй постановке задачи автоматизация требует непрерывного управления положением механизма и может быть названа *позиционной автоматизацией*.

Общие вопросы точного позиционирования и автоматического регулирования положения по отклонению рассмотрены в курсе теории электропривода [4]. Опираясь на эти сведения, рассмотрим основные особенности цикловой автоматизации типовых общепромышленных механизмов циклического действия. Основное внимание при этом следует уделить вопросам обеспечения требуемой точности остановки рабочего органа механизма и анализу влияния динамических свойств системы электропривода на производительность автоматизированных подъемно-транспортных установок.

4.2. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ТОЧНАЯ ОСТАНОВКА ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ

При цикловой автоматизации установка рабочего органа в требуемое фиксированное положение в простейшем случае обеспечивается отключением двигателя от сети и наложением механического тормоза, причем команда на отключение двигателя поступает от датчика точной остановки ДТО, установленного на некотором расстоянии от точки точной остановки (рис. 4-1). Так как положение датчика ДТО при работе остается неизменным, точность позиционирования при таком способе полностью определяется условиями движения электропривода с момента поступления в схему импульса на отключение двигателя до момента полной остановки.

Если принять, что отключение двигателя и наложение механического тормоза происходят одновременно и что усилие тор-

моза возрастает до установленного значения скачком, весь процесс остановки можно разделить на два этапа.

Первый этап обусловлен наличием собственного времени срабатывания аппаратуры t_a в схеме управления электроприводом. Вследствие возникающего запаздывания поступление в схему импульса от датчика точной остановки ДТО не вызывает немедленного отключения двигателя и наложения тормоза. В течение времени t_a рабочий орган механизма продолжает движение со скоростью v_n , с которой он подошел к датчику точной остановки, и проходит путь

$$S' = v_n t_a.$$

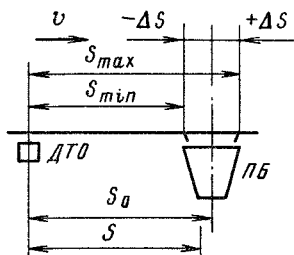


Рис. 4-1. К анализу процесса точной остановки электропривода.

на совершение работы по преодолению сил статического сопротивления движению на проходимом при этом пути S'' :

$$\frac{m_{\Sigma} v_n^2}{2} = (F_T + F_{ст}) S'',$$

где $m_{\Sigma} = J_{\Sigma} \frac{1}{\rho^2}$ — суммарная масса движущихся частей установки, приведенная к поступательному движению рабочего органа;

J_{Σ} — приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции электропривода;

$\rho = v/\omega$ — радиус приведения;

ω — угловая скорость двигателя, соответствующая линейной скорости движения рабочего органа v ;

$F_T + F_{ст}$ — суммарное усилие сопротивления движению, обусловленное моментом механического тормоза M_T и моментом статической нагрузки $M_{ст}$, приведенное к поступательному движению рабочего органа.

Искомое значение пути S'' , проходимого рабочим органом

механизма на втором этапе, определяется формулой

$$S'' = v_{\Pi}^2/2a,$$

где $a = (F_{\tau} + F_{c\tau})/m_{\Sigma}$ — ускорение системы в процессе остановки.

Полный путь, пройденный рабочим органом механизма с момента поступления в схему импульса датчика до полной остановки:

$$S = v_{\Pi}t_a + v_{\Pi}^2/2a. \quad (4-1)$$

Величины, определяющие полный путь S , в условиях работы механизма не остаются постоянными, а изменяются по различным причинам в более или менее широких пределах. Соответственно изменяется и путь S , чем объясняется невозможность получения абсолютно точной остановки электропривода. Ограничение отклонений полного пути от его среднего значения допустимыми пределами и является важнейшей целью, которая достигается при автоматизации точной остановки.

Если выразить в (4-1) наибольшие и наименьшие значения переменных через их средние значения $v_{\Pi 0}$, t_0 , a_0 и максимальные отклонения переменных Δv , Δt , Δa , подставить эти выражения в формулы для определения среднего пути торможения S_0 и максимальной неточности остановки ΔS

$$S_0 = (S_{\max} + S_{\min})/2; \quad \Delta S = (S_{\max} - S_{\min})/2,$$

выполнить необходимые преобразования и при этом пренебречь произведениями и квадратами относительных величин $\Delta t/t_0$, $\Delta v/v_{\Pi 0}$ и $\Delta a/a_0$, которые всегда значительно меньше единицы, можно получить следующие простые расчетные соотношения [4]:

$$S \approx v_{\Pi 0}t_0 + v_{\Pi 0}^2/2a \approx S'_0 + S''_0; \quad (4-2)$$

$$\Delta S \approx S'_0 \left(\frac{\Delta v}{v_{\Pi 0}} + \frac{\Delta t}{t_0} \right) + S''_0 \left(2 \frac{\Delta v}{v_{\Pi 0}} + \frac{\Delta a}{a_0} \right). \quad (4-3)$$

Анализ полученных выражений свидетельствует о том, что максимальная неточность остановки тем больше, чем больше средний путь при остановке и чем больше относительные отклонения всех переменных, от которых он зависит, от соответствующих средних значений. Рассмотрим влияние каждой переменной отдельно.

Параметр t_0 представляет собой суммарное среднее значение времени срабатывания всех последовательно действующих в схеме управления аппаратов. Среднее время срабатывания для каждого аппарата указывается в справочной литературе и там же оговаривается возможный разброс конкретных значений времени срабатывания. Для большинства аппаратов

в среднем возможный разброс времени срабатывания составляет $\pm 15 \div 20\%$ среднего времени срабатывания, поэтому относительное значение $\Delta t/t_0 = 0,15$ может быть с достаточной точностью принято в большинстве практических расчетов. Для уменьшения неточности остановки при проектировании схем автоматического управления подъемно-транспортными механизмами следует стремиться к уменьшению времени срабатывания аппаратуры t_0 путем использования быстродействующих аппаратов и сокращения числа последовательно действующих элементов схемы. При выполнении этого общего требования суммарное среднее время срабатывания аппаратуры в процессе проектирования является заданным.

Среднее значение ускорения a_0 , пренебрегая высшими степенями и произведениями относительных отклонений $F_T + F_{ст}$ и m_Σ , можно выразить с помощью формулы

$$a_0 = (F_{т0} + F_{ст0})/m_0. \quad (4-4)$$

Аналогично можно определить максимальное отклонение ускорения от среднего значения и затем, поделив на a_0 , получить относительное максимальное отклонение

$$\frac{\Delta a}{a_0} = \frac{\Delta F_T + \Delta F_{ст}}{F_{т0} + F_{ст0}} + \frac{\Delta m}{m_0}. \quad (4-5)$$

Из (4-2) и (4-3) следует, что для повышения точности остановки желательно увеличивать среднее ускорение a_0 и уменьшать его относительные отклонения от среднего значения $\Delta a/a_0$. В свою очередь значения a_0 и $\Delta a/a_0$ в соответствии с (4-4) и (4-5) определяются значениями и пределами изменения переменных $F_{ст}$, m_Σ и F_T .

Возможные значения статического усилия и приведенной массы установки полностью определяются конструктивными особенностями и режимом работы механизма. Изменения этих параметров являются заданными возмущениями, не поддающимися корректировке. Как было показано выше, для большинства подъемно-транспортных механизмов статические нагрузки изменяются в широких пределах, что и является важнейшей причиной разброса пути торможения и соответствующей неточности остановки.

Тормозное усилие F_T при проектировании для повышения точности остановки выбирается возможно большим. Увеличение тормозного усилия увеличивает среднее ускорение при торможении и в то же время при прочих равных условиях уменьшает его относительные отклонения, так как тормозное усилие является более стабильным, чем другие параметры

в (4-5). Если для механизма характерны значительные пределы изменения статической нагрузки, усилие тормоза в расчетах можно полагать постоянным, принимая $\Delta F_T = 0$. Для механизмов с относительно мало меняющейся статической нагрузкой необходимо учитывать возможность изменения усилия тормоза на $\pm 10 \div 20\%$ за счет ряда факторов, не поддающихся строгому учету (случайные изменения коэффициента трения, настройки тормоза и т. п.).

Возможности снижения неточности остановки за счет повышения усилия тормоза невелики вследствие необходимости ограничения максимального ускорения допустимым значением. Если принять, что при наложении тормоза максимальное ускорение a_{max} должно быть равно допустимому, можно определить максимально допустимое усилие тормоза, которое в дальнейших расчетах является заданным

$$F_{T, доп} = m_{\Sigma} a_{доп} - F_{ст, max}. \quad (4-6)$$

Формула (4-6) свидетельствует о том, что при данном допустимом ускорении $a_{доп}$ возможно увеличение максимально допустимого усилия тормоза за счет увеличения суммарной приведенной массы установки m_{Σ} . Увеличение m_{Σ} может быть достигнуто путем установки на валу двигателя маховика. При этом соответствующим увеличением тормозного момента удастся снизить относительные отклонения ускорения.

Следует подчеркнуть, что увеличение инерционных масс установки, работающей в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками и замедлениями, является нежелательным, так как влечет за собой увеличение динамических нагрузок двигателя и обусловленных ими потерь энергии. Поэтому рассматриваемый способ повышения точности остановки находит ограниченное применение на некоторых лебедках с червячным редуктором, предназначенных для пассажирских лифтов. Для лебедок этого типа в отдельных случаях повышают m_{Σ} за счет размещения на валу двигателя массивной соединительной муфты, которая одновременно служит и тормозным шкивом. Муфта имеет завышенный в требуемой степени момент инерции. В этих случаях завышение момента инерции установки, с одной стороны, позволяет получить требуемую точность остановки без усложнения системы электропривода, а с другой — создает более благоприятные условия для работы электропривода с червячным зацеплением.

С учетом всех перечисленных факторов реальные значения относительных отклонений ускорения $\Delta a/a_0$ лежат в пределах

0,1—0,5 и являются существенным возмущением, вызывающим неточность остановки.

Переходим к рассмотрению влияния средней остановочной скорости $v_{п0}$ и ее относительных отклонений в процессе работы. Если предположить, что механическая характеристика двигателя в процессе работы остается неизменной, можно

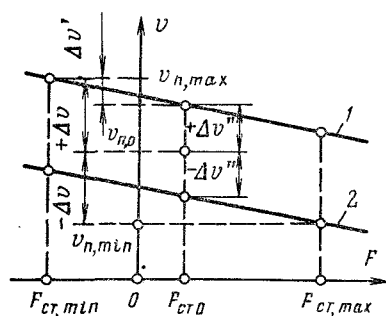


Рис. 4-2. Пределы изменения скорости при точной остановке.

прийти к выводу, что скорость двигателя при подходе к датчику точной остановки полностью определяется статической нагрузкой на валу двигателя и характеристикой двигателя в этом режиме. При этом возможные отклонения скорости v зависят от пределов изменения нагрузки на валу двигателя и жесткости механической характеристики.

Если изменения скорости могут вызываться другими причинами, например колебаниями напряжения сети, температурными изменениями сопротивлений или другими случайными факторами (предельным значениям их на рис. 4-2 соответствуют характеристики 1 и 2), полное отклонение должно учитывать влияние этих факторов:

$$\Delta v = \Delta v' + \Delta v'',$$

где смысл обозначений $\Delta v'$ и $\Delta v''$ поясняется рис. 4-2.

Средняя остановочная скорость $v_{п0}$ оказывает на максимальную неточность остановки наиболее значительное влияние. Из (4-2) и (4-3) видно, что от средней остановочной скорости зависят как среднее значение пути на первом этапе процесса остановки S'_0 , так и путь торможения S''_0 . Более того, путь торможения S''_0 зависит от квадрата остановочной скорости. Поэтому уменьшение средней остановочной скорости эффективно снижает и максимальную неточность остановки.

Относительное отклонение остановочной скорости от среднего значения $\Delta v/v_{п0}$ при данном значении $v_{п0}$ также оказывает существенное влияние на точность остановки. Чем выше жесткость механической характеристики двигателя перед остановкой, чем более стабильна начальная скорость привода v_n , тем точность остановки выше. При проектировании электроприводов с параметрическим регулированием скорости относи-

тельные отклонения скорости от среднего значения обычно принимают в пределах 0,2—0,5. При этом учитывается, что выбор слишком малых значений $\Delta v/v_{п,0}$ определяет высокую жесткость требуемой характеристики, которую в ряде случаев получить трудно. Выбор $\Delta v/v_{п,0} > 0,5$ также нежелателен, так как значения пускового момента на остановочной характеристике при этом недопустимо приближаются к максимальному моменту статической нагрузки. Кроме того, выбор слишком мягкой характеристики неблагоприятно отражается на длительности процесса дотягивания механизма к датчику точной остановки. Для замкнутых систем с астатическим регулированием скорости $\Delta v/v_{п,0} = 0$.

При рассматриваемом классическом способе осуществления точной остановки подбор необходимых значений $v_{п,0}$ и $\Delta v/v_{п,0}$ является единственно возможным способом, позволяющим обеспечить получение любой заданной точности остановки. Задачей проектирования точной остановки и является определение требуемой средней остановочной скорости и жесткости механической характеристики при дотягивании к датчику точной остановки, исходя из заданной допустимой неточности остановки $\Delta S_{доп}$, которая для различных механизмов лежит в пределах, указанных ниже.

Лифты скоростные, больничные и грузовые, загружаемые посредством напольного транспорта	10—20 мм
Лифты остальные	35—50 мм
Грузовые подъемники с вагонетками на рельсовом ходу	5—10 мм
Клетевые шахтные подъемники с качающимися площадками	50—200 мм
То же с посадкой на кулаки	50—100 мм
Скиповые шахтные подъемники и маятниковые канатные дороги	200—300 мм
Механизмы передвижения мостовых кранов с автоматической установкой по заданным координатам при дистанционном управлении в специальных случаях	10 мм
То же при автоматическом вызове и адресовании крана при управлении с пола	0,3—0,5 м

Исходное уравнение для определения параметров остановочной характеристики электропривода может быть получено, если в (4-3) положить $\Delta S = \Delta S_{доп}$. При этом необходимо учитывать, что (4-2) и (4-3) лишь приближенно оценивают искомые

величины. Если относительные отклонения на порядок меньше единицы, эти формулы обеспечивают высокую точность расчетов. Однако проведенный выше анализ показывает, что возможные значения относительных отклонений лежат в пределах 0,2–0,5. При этом наибольшая погрешность в определении среднего пути S_0 по (4-2) достигает 60–70%, а неточности остановки по (4-3) – 20–25%.

В процессе проектирования электропривода для определения средней остановочной скорости по допустимой неточности остановки можно воспользоваться формулой (4-3), учитывая влияние отклонений высших порядков поправочным коэффициентом k_{Π} . При этом получается следующее квадратное уравнение:

$$v_{\Pi,0}^2 + 2k_1 a_0 t_0 v_{\Pi,0} - 2k_2 a_0 \Delta S_{\text{доп}} / k_{\Pi} = 0.$$

Требуемая средняя остановочная скорость

$$v_{\Pi 0} = \sqrt{k_1^2 a_0^2 t_0^2 + 2k_2 a_0 \Delta S_{\text{доп}} / k_{\Pi}} - k_1 a_0 t_0, \quad (4-7)$$

где $k_1 = \frac{\Delta v / v_{\Pi 0} + \Delta t / t_0}{2\Delta v / v_{\Pi 0} + \Delta a / a_0}$;

$$k_2 = \frac{k_1}{\Delta v / v_{\Pi 0} + \Delta t / t_0}.$$

Отрицательный корень решения квадратного уравнения опущен из физических соображений. Поправочный коэффициент $k_{\Pi} = 1,05 \div 1,25$, причем большие значения k_{Π} следует брать соответственно при больших относительных отклонениях $\Delta v / v_{\Pi 0}$, $\Delta t / t_0$ и $\Delta a / a_0$.

При определении средней остановочной скорости по (4-7) необходимо задаваться относительными отклонениями скорости в рекомендованных выше пределах $\Delta v / v_{\Pi 0} = 0,2 \div 0,5$. Для каждого значения $\Delta v / v_{\Pi 0}$ можно определить соответствующую среднюю остановочную скорость $v_{\Pi 0}$. Полученные таким образом пары значений $v_{\Pi 0}$ и $\Delta v / v_{\Pi 0}$ определяют семейство механических характеристик привода, обеспечивающих заданную точность остановки (рис. 4-3).

Для построения характеристики сначала необходимо вычислить полное абсолютное отклонение скорости

$$\Delta v = v_{\Pi 0} (\Delta v / v_{\Pi 0}),$$

затем определить допустимое отклонение, обусловленное только жесткостью механической характеристики,

$$\Delta v' = \Delta v - \Delta v''$$

и выполнить построение соответствующей характеристики аналогично показанному на рис. 4-3. Из семейства полученных характеристик следует выбирать такую, которая наиболее просто и удобно может быть реализована в принятой системе электропривода.

Анализ условий точной остановки автоматизированных подъемно-транспортных механизмов необходимо дополнить замечаниями о двух факторах, влияние которых выше не учитывалось. Такими факторами являются возможная погрешность в срабатывании датчика точной остановки и упругость подъемных канатов на подъемных установках с большой высотой подъема.

Полученные выше соотношения дают действительные значения максимальной неточности остановки, если импульс на отключение двигателя поступает в схему от датчика точной остановки всегда в одной и той же точке пути на расстоянии S_0 от места точной остановки. При наличии погрешности в срабатывании датчика импульс в схему поступает на различном расстоянии рабочего органа механизма от места точной остановки. Возникает дополнительная неточность остановки $\Delta S_{ДТО}$, численно равная возможной погрешности в срабатывании датчика относительно его среднего положения, приведенной к поступательному движению рабочего органа механизма. При этих условиях при проектировании точной остановки следует принимать расчетную допустимую неточность остановки

$$\Delta S_{\text{доп}} = \Delta S_{\text{доп,ном}} - \Delta S_{\text{ДТО}},$$

где $\Delta S_{\text{доп,ном}}$ — максимально допустимая фактическая неточность остановки, требуемая по нормам для данного механизма.

Упругость канатов также вызывает дополнительную неточность остановки. Действительно, даже в том случае, когда подъемный сосуд остановлен у уровня остановки абсолютно точно, в процессе его разгрузки и загрузки вследствие изменения удлинения каната будут возникать отклонения от уровня точной остановки. В общем случае их можно учесть при проек-

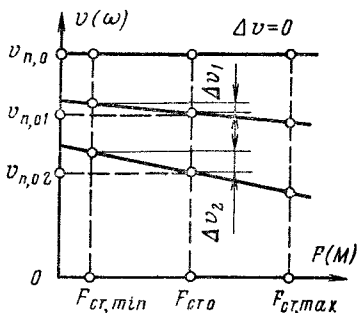


Рис. 4-3. Механические характеристики электропривода, обеспечивающие заданную точность остановки.

тировании аналогично учету погрешности путевого датчика

$$\Delta S_{\text{доп}} = \Delta S_{\text{доп,ном}} - \Delta S_{\text{ДТО}} - \Delta l/2, \quad (4-8)$$

где Δl — удлинение каната при изменении загрузки подъемного сосуда от $G = 0$ до $G = G_{\text{ном}}$.

Удлинение каната Δl при прочих равных условиях увеличивается с возрастанием высоты подъема. При большой высоте подъема, как это имеет место, например, на глубоких шахтах, обеспечить требуемую точность остановки без применения специальных мер не удастся. В этих случаях удлинение каната Δl превосходит допустимую по нормам неточность остановки. Его учет в (4-8) либо недопустимо снижает расчетную неточность остановки $\Delta S_{\text{доп}}$, либо дает отрицательные значения $\Delta S_{\text{доп}}$, свидетельствуя о невозможности получения требуемой точности при учете удлинения каната. Поэтому для подъемных установок с большой высотой подъема устранение влияния на точность остановки изменений длины подъемного каната представляет собой самостоятельную задачу. Эта задача может быть решена следующими способами:

1) использованием качающихся погрузочно-разгрузочных площадок;

2) механической фиксации подъемного сосуда на время погрузочно-разгрузочных операций.

Эти способы находят применение на клетевых шахтных подъемных установках даже при невысоком уровне автоматизации управления машиной. Для таких установок необходимо стыкование рельсов клетки с рельсами на приемной площадке с точностью $\pm 5 \div 10$ мм. Получение такой точности при ручном управлении вызывает затруднения. Применением качающихся площадок допустимая неточность остановки увеличивается до ± 200 мм, и управление шахтной подъемной машиной существенно упрощается. В пределах ± 200 мм качающиеся площадки могут компенсировать как неточность, возникшую в процессе остановки клетки у приемной площадки, так и влияние упругости каната в процессе выгрузки и загрузки вагонеток.

На глубоких шахтах выкатывание тяжелой вагонетки из клетки может вызывать изменение длины каната ($\Delta l = 0,7 \div 0,8$ м) [18]. Компенсировать столь значительные перемещения качающимися площадками не удастся, поэтому используют механическую фиксацию подъемного сосуда у приемной площадки. На шахтных подъемных машинах для этого предусматриваются так называемые посадочные кулаки, на которые опускается клеть для разгрузки и загрузки. Использованием посадочных

кулаков влияние упругости каната устраняется полностью. Однако при автоматизации таких установок возникает необходимость автоматизации маневров в процессе установки подъемных сосудов на кулаки, что влечет за собой усложнение схемы и увеличение длительности рабочего цикла.

4.3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРИ ЦИКЛОВОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

Повышение требований к точности остановки подъемно-транспортных механизмов, с одной стороны, и совершенствование техники управления электроприводами — с другой, привели к широкому использованию при цикловой автоматизации систем автоматического регулирования положения рабочего органа механизма по отклонению от уровня точной остановки. При этом процесс точной остановки протекает в два этапа: на первом этапе происходит замедление электропривода от рабочей скорости до пониженной, а на втором этапе рабочий орган механизма входит в зону автоматического контроля положения и система регулирования устанавливает его в заданную позицию с требуемой точностью. Если разгрузочно-погрузочные операции производятся без наложения механического тормоза, электропривод под действием системы регулирования положения непрерывно компенсирует возмущения, обусловленные упругостью подъемного каната, и удерживает рабочий орган в зоне остановки с требуемой точностью. Устройства для автоматического выравнивания, воздействующие на привод подъемной лебедки или механизма передвижения, в настоящее время используются для повышения точности остановки и в тех случаях, когда после выравнивания должен накладываться механический тормоз.

Схема расстановки датчиков контроля положения приведена на рис. 4-4, а. Индуктивные датчики точной остановки $ДТВ$ и $ДТН$, расположенные на кабине подъемника, у уровня точной остановки замыкаются скобой $ЗС$. При этом сигналы на выходе $ДТВ$ и $ДТН$ имеют наименьшее значение и равны друг другу. При опускании кабины вниз на расстояние l магнитопровод датчика $ДТВ$ размыкается и на его выходе сигнал максимален. При подъеме на расстояние l соответственно максимален сигнал на выходе датчика $ДТН$.

Датчики $ДТВ$ и $ДТН$ могут быть использованы для управления релейной системой контроля положения либо включены в непрерывную дифференциальную схему контроля положения, дающую зависящий от положения кабины сигнал $u_{к.л} = f(\Delta S)$, воздействующий на систему автоматического регулирования положения по отклонению от уровня точной остановки.

В релейной системе (рис. 4-4, б) на выход датчиков $ДТВ$ и $ДТН$ подключаются реле $РТВ$ и $РТН$, которые в режиме выравнивания непосредственно управляют реверсивными контакторами $КВ$ и $КН$. Если кабина находится ниже уровня этажа, то включен контактор $В$ и осуществляется подъем кабины со скоростью v_n до точки, в которой на-

пряжение на выходе датчика ДТВ, уменьшаясь, станет равным напряжению отпадания реле РТВ. Реле РТВ отпадает и отключает контактор КВ, накладывается механический тормоз.

В процессе торможения кабина может достигнуть точки выше уровня этажа, в которой напряжение на выходе датчика ДТН, увеличиваясь, становится равным напряжению срабатывания реле РТН. Реле

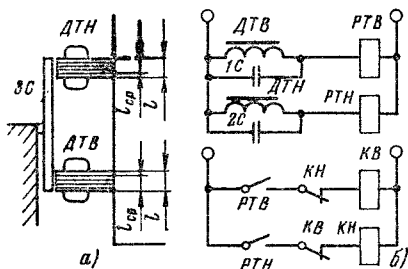


Рис. 4-4. Расстановка датчиков (а) и узлы релейной схемы выравнивания (б).

РТН (РТВ), и процесс выравнивания закончится. Очевидно, расстояние между точками срабатывания реле РТВ и РТН $2l_{\text{ср}}$ должно быть связано с допустимой неточностью остановки соотношением $2l_{\text{ср}} = 2\Delta S_{\text{доп}}$.

Таким образом, процесс выравнивания сопровождается затухающими колебаниями, а при определенных условиях за счет влияния времени срабатывания аппаратуры может быть и неустойчивым. Более детальный анализ рассматриваемого процесса показывает, что удовлетворительное затухание колебаний обеспечивается выбором такой средней начальной скорости $v_{\text{н0}}$, при которой за время торможения скорость успевает снизиться до конечной скорости $v_{\text{н,к}} = (0,2 \div 0,3) v_{\text{н0}}$. При этом с некоторым приближением можно записать:

$$v_{\text{н0}} t_0 + 0,91 \frac{v_{\text{н0}}^2}{2a_0} \approx 2\Delta S_{\text{доп}}$$

Решая полученное уравнение относительно скорости, получаем:

$$v_{\text{н0}} \approx 1,1 \left(\sqrt{a_0^2 t_0^2 + 3,6 a_0 \Delta S_{\text{доп}}} - a_0 t_0 \right). \quad (4-9)$$

Сравнивая (4-7) и (4-9), можно заключить, что при применении рассмотренной релейной системы регулирования положения требуемый диапазон регулирования скорости остается примерно тем же, что и в разомкнутой системе.

Вариант схемы, позволяющей получить на выходе непрерывный сигнал $u_{\text{к,п}} = f(\Delta S)$, представлен на рис. 4-5, а. Здесь напряжение $u_{\text{к,п}} = u_{d1} - u_{d2}$, где u_{d1} и u_{d2} — напряжения на выходе выпрямителей В1 и В2, соответственно зависящие от индуктивного сопротивления датчиков ДТВ и ДТН. Характеристики схемы приведены на рис. 4-5, б.

В системе непрерывного действия теоретически можно получить любую требуемую точность остановки. Если обозначить статический коэффициент усиления системы выравнивания

$$-k_{в,ст} = M/u_{к,п},$$

а максимальный сигнал на выходе схемы контроля положения $U_{к,п,мах}$, то можно установить взаимосвязь между допустимой неточностью

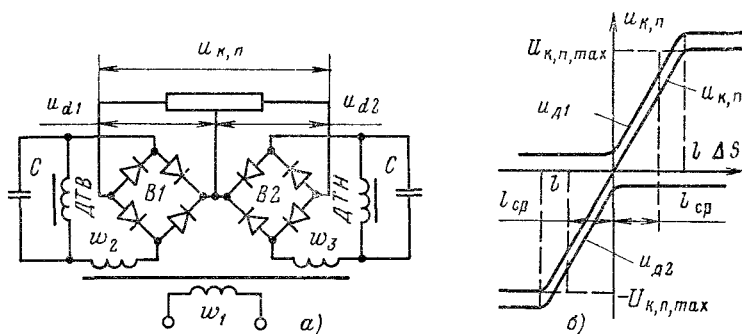


Рис. 4-5. Схема непрерывного контроля положения (а) и ее характеристики (б).

остановки и коэффициентом усиления $k_{в,ст}$ при заданной ширине зоны $2l$, в пределах которой $u_{к,п}$ изменяется от $+U_{к,п,мах}$ до $-U_{к,п,мах}$ (см. рис. 4-5, б), полагая $\Delta S_{доп} < l$:

$$k_{в,ст} = M_{сг,мах}l/U_{к,п,мах}\Delta S_{доп}. \quad (4-10)$$

В процессе выравнивания динамический момент электропривода непрерывно изменяется, то возрастая от нуля до наибольшего значения, то вновь уменьшаясь до нуля. Если принять среднее ускорение при замедлении и разгоне в зоне выравнивания равным $(0,2-0,3)a_{доп}$, то из условия ограничения колебаний можно получить ориентировочное соотношение для определения требуемой средней остановочной скорости

$$v_{п0} < (0,9 - 1,1) \sqrt{a_{доп}l}.$$

Например, если для скоростного лифта $v_p = 3,5$ м/с, $l = 0,02$ м, $a_{доп} = 2$ м/с², то требуемая остановочная скорость должна выбираться из условия $v_{п0} < 0,18-0,2$ м/с. При проектировании таких лифтов обычно принимают $v_{п0} = 0,15 \div 0,2$ м/с.

При использовании типовой трехконтурной структуры позиционно-го электропривода, рассматриваемой в § 4-5, требуемая остановочная скорость может быть значительно повышена за счет применения регулятора положения с параболической характеристикой [4].

4-4. ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МЕХАНИЗМОВ ПРИ ЦИКЛОВОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

Для анализа влияния динамических свойств электропривода рассмотрим технологическую схему автоматического перемещения порции груза от места загрузки к месту выгрузки, представленную на рис. 4-6, а. Соответствующий цикл работы подъемно-транспортного механизма включает в себя пуск электропривода, движение с установившейся скоростью до датчика импульса на замедление ДИЗ, замедление до скорости, обеспечивающей заданную точность остановки, дотягивание рабочего органа механизма к датчику точной остановки ДТО и, наконец, отключение двигателя и наложение механического тормоза, а в других случаях включение системы автоматического выравнивания рабочего органа механизма у приемного пункта. Характерная для автоматизированных подъемно-транспортных машин тахограмма $v = f(t)$, соответствующая подобным циклам работы, имеет вид представленной на рис. 4-6, б.

Типовая тахограмма построена в предположении, что к переходным процессам электропривода предъявляется только требование ограничения ускорений, причем для всех режимов работы механизма максимально допустимое ускорение $a_{\text{доп}}$ предполагается одинаковым. Наличие периодов ускорения и замедления электропривода снижает среднюю скорость движения механизма за время работы в цикле в тем большей степени, чем большую долю от времени работы механизма t_p составляет длительность переходных процессов $t_{\text{п.п.}}$. Длительность переходных процессов увеличивается с уменьшением ускорения, т. е. требование ограничения ускорения при прочих равных условиях снижает производительность механизма. Поэтому с целью получения максимальной производительности при автоматизации необходимо стремиться к полному использованию заданного допустимого ускорения, принимая в качестве оптимального закона изменения скорости привода в переходных процессах равномерно ускоренное движение при $a = a_{\text{доп}}$.

Требование ограничения ускорений предъявляется ко всем подъемно-транспортным механизмам, но по различным причинам.

Наиболее характерны в этом отношении подъемно-транспортные механизмы, предназначенные для перемещения пассажиров. К их числу относятся пассажирские лифты, грузопассажирские шахтные подъемники, грузовые подъемники промыш-

ленных предприятий, на которых возможен проезд людей, и т. п. Для всех этих механизмов допустимые ускорения строго ограничиваются значением, при котором динамические нагрузки, воздействующие на организм человека в переходных процессах, не вызывают недопустимо неприятных ощущений. Существует понятие так называемого «комфортабельного» ускорения, т. е. ускорения, которое не оказывает неблагоприятного действия на пассажиров независимо от их возраста и состояния

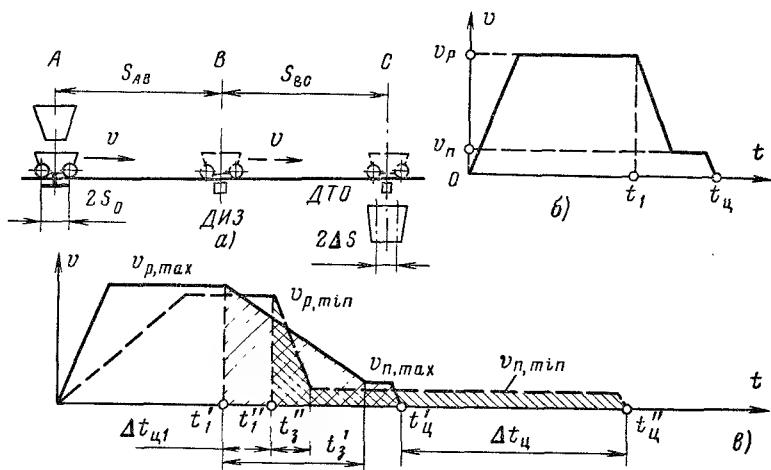


Рис. 4-6. Схема рабочего цикла автоматизированного механизма передвижения (а) и соответствующие зависимости $v(t)$ (б, в).

здоровья. Для пассажирских подъемников «комфортабельное» ускорение принимается равным $1,5 \text{ м/с}^2$. Правилами устройства и безопасной эксплуатации лифтов [25] для пассажирских лифтов установлено допустимое рабочее ускорение $a_{\text{доп}} = 2 \text{ м/с}^2$. При остановке лифта воздействием на кнопку «Стоп» допускается ускорение 3 м/с^2 для лифтов с номинальной скоростью кабины до 2 м/с и 5 м/с^2 для лифтов с номинальной скоростью 4 м/с . Для больничных лифтов $a_{\text{доп}} = 1 \text{ м/с}^2$. Для шахтных подъемных установок ускорение при подъеме и спуске людей по вертикальным выработкам не должно превышать $0,75 \text{ м/с}^2$, а по наклонным $0,5 \text{ м/с}^2$.

Для подъемно-транспортных механизмов, предназначенных только для перемещения различных грузов и материалов, необходимость ограничения ускорений вызывается другими причинами. Для большого числа механизмов допустимые значения ускорения определяются максимально допустимыми нагрузка-

ми металлоконструкций механизма или необходимостью ограничения колебаний в упругих элементах подъемно-транспортной установки (см. § 2-6). В случаях, когда поступательно движущиеся массы установки обладают значительной инерцией, а движущее или тормозное усилие передается от привода к механизму через фрикционную связь, максимально допустимые ускорения ограничиваются значениями, при которых надежно исключаются проскальзывания и пробуксовки фрикционного элемента. К числу таких механизмов относятся механизмы передвижения кранов, подъемные лебедки с канатоведущими шкивами и ряд аналогичных механизмов.

Численные значения допустимого ускорения для этих механизмов в каждом конкретном случае задаются конструкторами-механиками в технических условиях на проектирование электропривода. Очевидно, здесь, так же как и для пассажирских установок, заданную величину ускорения следует считать предельно допустимой и проектировать электропривод так чтобы возможные отклонения ускорения во всех случаях были направлены в сторону уменьшения относительно заданного значения.

Поскольку ускорение $a_{\text{доп}}$ является максимально допустимым, электропривод при автоматизации должен проектироваться таким образом, чтобы ускорение либо поддерживалось при возмущениях постоянным, либо могло изменяться под действием этих возмущений только в сторону снижения относительно допустимого значения. Важнейшим возмущением, вызывающим изменения ускорения привода, является изменение загрузки механизма, которое вызывает изменения статической нагрузки привода $M_{\text{ст}}$ и суммарного момента инерции движущихся масс установки J_{Σ} . В соответствии с уравнением движения при пуске с максимальной нагрузкой на валу двигатель для получения ускорения $a_{\text{доп}} = \varepsilon_{\text{доп}}\rho$ должен развивать максимальный пусковой момент

$$M_{\text{max}} = M_{\text{ст,max}} + J_{\Sigma,\text{max}}\varepsilon_{\text{доп}}$$

Для получения того же ускорения при минимальной нагрузке необходим минимальный момент

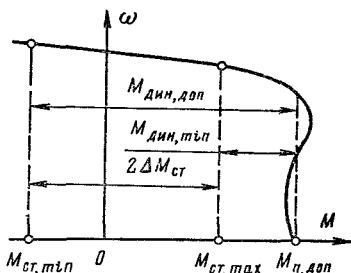
$$M_{\text{min}} = M_{\text{ст,min}} + J_{\Sigma,\text{min}}\varepsilon_{\text{доп}}$$

Таким образом, при изменяющейся нагрузке для полного использования допустимого ускорения во всех режимах необходимы различные моменты привода. Система электропривода должна автоматически реагировать на изменения нагрузки на валу, обеспечивая изменением момента двигателя поддержание постоянства ускорения в переходных процессах. Чем в более

широких пределах изменяется нагрузка на валу двигателя, тем соответственно шире пределы изменения пускового или тормозного момента привода при постоянном ускорении.

На практике для автоматизированных общепромышленных механизмов широко применяются простейшие системы электропривода, для которых характерна независимая от нагрузки взаимосвязь между моментом и скоростью, определяемая статической механической характеристикой привода. При этом не-

Рис. 4-7. Пределы изменения динамического момента при пуске с постоянным моментом двигателя.



изменным является выбранный при проектировании или установленный при наладке пусковой момент, допустимое значение которого, исходя из требования ограничения ускорений, определяется минимальной нагрузкой

$$M_{п, доп} = M_{ст, min} + J \Sigma_{min} \epsilon_{доп} \quad (4-1)$$

Допустимое значение момента двигателя в процессе замедления

$$M_{т, доп} = M_{ст, max} - J \Sigma_{max} \epsilon_{доп}$$

На рис. 4-7 представлена в качестве примера механическая характеристика асинхронного двигателя с двойной беличьей клеткой, которая обеспечивает при постоянной нагрузке $M_{ст} = M_{ст, min}$ практически равномерно ускоренный переходный процесс пуска с допустимым ускорением $a_{доп}$ под действием среднего пускового момента $M_{п, доп}$. Если при работе механизма статическая нагрузка остается неизменной, подобная механическая характеристика обеспечивает оптимальное протекание переходного процесса пуска в указанном выше смысле. При изменяющейся нагрузке допустимое ускорение может быть получено только при минимальной нагрузке. При всех других нагрузках ускорение меньше допустимого и достигает минимального значения a_{min} при максимальной нагрузке. Так как, принимая $J \Sigma \approx \text{const}$,

$$a_{min} = a_{доп} \frac{M_{п, доп} - M_{ст, max}}{M_{п, доп} - M_{ст, min}},$$

с учетом (4-11) можно записать:

$$a_{\min} = a_{\text{доп}} \frac{J_{\Sigma, \min} \varepsilon_{\text{доп}} - 2\Delta M_{\text{ст}}}{J_{\Sigma, \min} \varepsilon_{\text{доп}}}, \quad (4-12)$$

где $\Delta M_{\text{ст}} = (M_{\text{ст}, \max} - M_{\text{ст}, \min})/2$ — пределы изменения статической нагрузки.

Из (4-12) следует, что при данном допустимом ускорении $a_{\text{доп}}$ минимальное ускорение $a_{\min}$ тем меньше, чем меньше разность между допустимым динамическим моментом $J_{\Sigma, \min} \varepsilon_{\text{доп}}$ и пределами изменения нагрузки $2\Delta M_{\text{ст}}$. При условии

$$2\Delta M_{\text{ст}} \ll M_{\text{дин}, \text{доп}} = J_{\Sigma, \min} \varepsilon_{\text{доп}}$$

ускорение при работе механизма изменяется в незначительных пределах и максимальная производительность механизма при прочих равных условиях обеспечивается использованием простейших систем электропривода с пусковым моментом, не зависящим от нагрузки. Если пределы изменения нагрузки соизмеримы с допустимым динамическим моментом, ускорение привода при работе изменяется в широких пределах. Если при этом переходные процессы занимают в цикле заметное место, значительное снижение ускорения при больших нагрузках может недопустимо снижать производительность механизма. Наконец, в случаях, когда

$$2\Delta M_{\text{ст}} = M_{\text{дин}, \text{доп}}$$

минимальное ускорение $a_{\min} = 0$ и осуществить пуск привода при максимальной нагрузке с не зависящим от нагрузки пусковым моментом $M_{\text{п}, \text{доп}}$ невозможно.

При $2\Delta M_{\text{ст}} \geq M_{\text{п}, \text{доп}}$ обеспечить ограничение ускорений автоматизированного подъемно-транспортного механизма можно только путем использования системы электропривода, которая развивает в переходных процессах при разных статических нагрузках различные пусковые и тормозные моменты. Для высокопроизводительных реверсивных подъемно-транспортных механизмов требования в отношении поддержания постоянства ускорения могут быть весьма жесткими.

Необходимо заметить, что при $2\Delta M_{\text{ст}} \geq M_{\text{дин}, \text{доп}}$ требование ограничения ускорения на заключительном периоде типовой тахограммы (рис. 4-6, б) в процессе окончательного торможения под действием наложенного механического тормоза практически не может быть выполнено. Усилие тормоза постоянно, не зависит от нагрузки и выбирается из соображений надежности с запасом по отношению к максимальному моменту нагрузки. Приведенный выше анализ позволяет заключить, что при таких условиях ускорение при наложенном тормозе и на-

ибольшем тормозном моменте нагрузки $M_{ст, max}$ обязательно в значительной степени превысит допустимое $a_{max} > a_{доп}$. Обеспечить ограничение ускорения в этом режиме можно путем использования системы непрерывного выравнивания без наложения тормоза либо с наложением тормоза после окончания процесса точной остановки.

Влияние колебаний ускорения на производительность автоматизированного механизма можно наглядно проанализировать с помощью тахограмм, представленных на рис. 4-6, в, построенных в предположении, что момент, развиваемый приводом в переходных процессах, не зависит от статической нагрузки. В соответствии со схемой на рис. 4-6, а элементарный цикл перемещения механизма распадается на два этапа: перемещение от исходной точки до датчика импульса на замедление ДИЗ на расстояние S_{AB} и последующее движение вплоть до остановки.

Сравнивая тахограммы на рис. 4-6, в, можно видеть, что при пуске с минимальной нагрузкой на валу ускорение равно допустимому, средняя скорость движения на первом этапе максимальна и путь S_{AB} рабочий орган механизма проходит за время t'_1 . При пуске с максимальной нагрузкой ускорение значительно меньше допустимого, средняя скорость передвижения меньше и соответственно путь S_{AB} механизм проходит за большее время t''_1 . При этом возникшая за счет различных ускорений при пуске разница в пути на первом этапе перемещения отработывается механизмом при полной скорости $v_{p, min}$, что обеспечивает при прочих равных условиях минимальное время $\Delta t_{ц1} = t''_1 - t'_1$. Анализ движения на втором этапе (после срабатывания датчика импульса на замедление (ДИЗ) показывает, что изменения ускорения при замедлении электропривода до пониженной скорости оказывают на производительность механизма значительно более неблагоприятное влияние.

Датчик импульса на замедление ДИЗ должен быть установлен с таким расчетом, чтобы при любых возможных условиях рабочий орган механизма подходил к датчику точной остановки ДТО с требуемой по условиям точной остановки установившейся пониженной скоростью. Очевидно, расстояние S_{BC} , на котором он установлен от датчика точной остановки ДТО, должно быть равно или несколько больше максимального пути, который проходит механизм в процессе замедления от рабочей до установившейся пониженной скорости. С учетом среднего пути торможения после срабатывания ДТО S_0 можно записать:

$$S_{BC} = k_3 S_{3, max} + S_0, \quad (4-13)$$

где $S_{з, max}$ — наибольший путь замедления при переходе на пониженную скорость;
 $k_3 = 1.05 \div 1.1$ — коэффициент запаса.

Обращаясь вновь к рассмотрению рис. 4-6, в. можно видеть, что при минимальной нагрузке на валу время замедления t_3 максимально, максимален путь, пройденный в процессе замедления, и соответственно незначителен участок работы с установившейся пониженной скоростью $v_{п, max}$. При максимальной нагрузке $M_{ст} = M_{ст, max}$ ускорение в процессе замедления максимально и равно допустимому $a_{доп}$. Скорость быстро уменьшается до установившейся $v_{п, min}$ за время t'_3 , и так как путь замедления при этом минимален ($S = S_{з, min}$), за время замедления механизм успевает пройти лишь часть расстояния S_{BC} до датчика точной остановки. Остальной путь $S_{BC} - S_{з, min}$ механизм преодолевает с пониженной скоростью $v_{п, min}$ и соответственно процесс дотягивания к датчику точной остановки при неблагоприятных условиях может оказаться недопустимо затянутым.

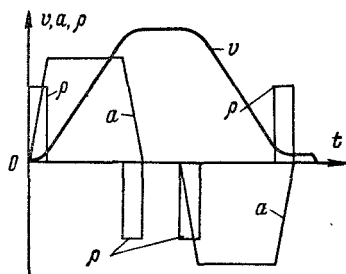
На рис. 4-6, в редкой штриховкой показана площадь, пропорциональная расстоянию S_{BC} в случае минимальной нагрузки механизма. Равновеликая ей площадь в случае движения с максимальной загрузкой выделена частой штриховкой. Сравнивая соответствующие графики, можно наглядно видеть, что значительное увеличение рабочего цикла обусловлено тем, что возникшую при замедлении разницу в пройденном пути механизм обрабатывает на низкой скорости $v_{п, min}$.

Таким образом, изменения ускорения в переходных процессах автоматизированного подъемно-транспортного механизма вызывают увеличение длительности цикла. Это увеличение тем значительнее, чем выше рабочая скорость v_p и чем меньше в сравнении с ней требуемая по условиям точной остановки скорость $v_{п, min}$. Наиболее существенное увеличение длительности цикла вызывают изменения ускорения в процессе замедления до ползучей скорости. Поэтому в ряде случаев достаточно высокую производительность механизма при автоматизации удается получить, обеспечивая поддержание ускорения только на участке замедления. Разумеется, такая возможность имеется в том случае, если допустимый динамический момент в соотношении (4-12) значительно больше пределов изменения статической нагрузки $2\Delta M_c$.

При автоматизации механизмов, обслуживающих большое число остановочных пунктов, возможны случаи, когда при выполнении операции перемещения груза между соседними пунк-

тами электропривод должен переключаться на замедление до того, как в процессе пуска его скорость достигнет установившегося значения v_p . Такие условия, например, имеют место при поэтажном перемещении кабины скоростного лифта, когда наибольшая скорость, до которой успевает разогнаться двигатель, в 1,5–2 раза меньше установившейся. Соответственно намного меньше при этом и путь замедления. Если расстояние между датчиками ДИЗ и ДТО выбрано исходя из наибольшего

Рис. 4-8. Оптимальная зависимость $v = f(t)$ при необходимости ограничения ускорения и рывка.



пути замедления при начальной скорости $v_{нач} = v_p$, при поэтажном разезде дотягивание, очевидно, будет чрезмерно длительным даже при условии поддержания постоянства ускорения с высокой степенью точности. В подобных случаях необходимо предусматривать дополнительный датчик импульса на замедление, действующий только при поэтажном разезде, либо использовать на участке замедления управление скоростью в функции пути.

Важнейшим дополнительным требованием к динамике автоматизированных электроприводов подъемно-транспортных машин является требование высокой плавности протекания всех переходных процессов.

Величиной, характеризующей плавность переходного процесса, является первая производная от ускорения $\rho = da/dt = d^2v/dt^2$, которую применительно к лифтам принято называть «рывком». Ограничение рывка на скоростных пассажирских лифтах имеет особо важное значение, так как создает у пассажира ощущение плавности переходного процесса, уменьшающее неприятные воздействия максимального ускорения. Оптимальная с точки зрения получения максимальной производительности тахограмма механизма при условии ограничения ускорения и рывка представлена на рис. 4-8.

Повышение плавности переходных процессов путем ограничения рывка желательно практически для всех подъемно-транспортных механизмов даже в тех случаях, когда правилами

и нормами рывок не ограничивается. Причиной этого, как было установлено выше, является необходимость ограничения ударов в передачах при выборе зазоров, динамических нагрузок, обусловленных упругими колебаниями, а также раскачивания подвешенного на канате груза.

Проведенный анализ особенностей цикловой автоматизации свидетельствует о том, что в ее основе лежит автоматическое управление скоростью электропривода. Позиционная автоматизация по определению требует автоматического управления положением механизма на всех этапах работы, которое при цикловой автоматизации используется лишь при автоматическом выравнивании у уровня точной остановки. Однако ограничения, накладываемые на ускорение и рывок, а также изложенные соображения об оптимальном характере тахограмм, справедливы и для случаев позиционной автоматизации.

4.5. ТИПОВЫЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ С АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ РАБОЧИМ ЦИКЛОМ

Требования точной остановки и ограничения ускорений являются важнейшими технологическими требованиями, предъявляемыми к электроприводу рассматриваемых механизмов при их цикловой автоматизации. Условия точной остановки определяют требуемый диапазон регулирования скорости, а требование ограничения ускорений дает четкую картину необходимых динамических качеств электропривода. Поэтому проведенный выше анализ этих требований позволяет осуществить при автоматизации обоснованный выбор системы электропривода по техническим условиям.

В основе такого выбора всегда лежит естественное стремление использовать наиболее простой и надежный вариант электропривода, отвечающий поставленным требованиям. Во всех случаях переход к более сложным системам электропривода осуществляется только после обоснования невозможности использования простейших систем. Рассмотрим несколько общих соображений о выборе системы электропривода при автоматизации различных подъемно-транспортных механизмов.

Требования к электроприводу, обусловленные необходимостью точной остановки, определяются диапазоном регулирования скорости $D = v_p/v_{ц.0}$. Условия ограничения ускорений, как выше было показано, зависят от соотношения между допустимым динамическим моментом $M_{дин,доп}$ и пределами изме-

нения нагрузки на валу двигателя $2\Delta M_{ст}$. Можно выделить три варианта такого соотношения. При $M_{дин.доп} \gg 2\Delta M_{ст}$ изменения нагрузки практически не вызывают изменений ускорения и каких-либо дополнительных требований к динамике привода не предъявляется. Второй случай, когда $M_{дин.доп} > 2\Delta M_{ст}$, соответствует таким условиям, когда изменения нагрузки вызывают заметные изменения ускорения, но на производительности механизма при автоматизации ощутимо сказываются только изменения нагрузки в процессе замедления до пониженной скорости. Очевидно, при прочих равных условиях это влияние возрастает с увеличением рабочей скорости механизма v_p и соответственно диапазона регулирования D . Наконец, в наиболее тяжелом случае при $M_{дин.доп} \leq 2\Delta M_{ст}$ необходимо поддержание постоянства ускорения во всех переходных процессах. В реальных условиях это соотношение чаще всего наблюдается у высокоскоростных механизмов, требующих глубокого регулирования скорости.

В первых двух случаях при цикловой автоматизации типовых общепромышленных механизмов имеются широкие возможности для применения простейших систем электропривода. Для механизмов, рабочая скорость которых невелика, требуемая точность остановки может обеспечиваться при применении нерегулируемого электропривода с асинхронным короткозамкнутым двигателем. При $D \leq 10$ и первых двух вариантах соотношения между допустимым динамическим моментом и пределами изменения нагрузки на валу двигателя успешно применяются многоскоростные асинхронные двигатели, асинхронные двигатели с тиристорными регуляторами напряжения, двигатели постоянного тока с использованием схемы шунтирования якоря и аналогичные им системы с ограниченными возможностями регулирования скорости и не обеспечивающие поддержания постоянства ускорения в переходных процессах с различными нагрузками.

Наиболее сложные требования к электроприводу предъявляются при цикловой автоматизации высокопроизводительных подъемно-транспортных машин, обладающих большими рабочими скоростями. К электроприводу таких установок предъявляются высокие требования в отношении регулирования скорости $D = 10 \div 50$ и жесткие требования в отношении поддержания постоянства ускорения, изменения которого вызывают существенное увеличение длительности цикла и соответствующее снижение производительности установки. Удовлетворить этим требованиям могут только совершенные системы, обеспечивающие непрерывное и точное управление скоростью элек-

тропривода на всех этапах цикла, т. е. электроприводы по системе УП — Д.

В качестве типовой структуры электропривода, отвечающей этим требованиям, можно указать систему подчиненного регулирования тока и скорости, схема которой показана на рис. 2-27. На вход схемы для формирования оптимальной тахограммы должен быть включен датчик интенсивности первого или второго порядка [4]. Рассмотрим, какую точность отработки, заданной датчиком интенсивности диаграммы скорости $\omega_3 = f(t)$, может обеспечить такая система. Так как на производительности механизма наиболее сильно сказывается ошибка по пути замедления перед точной остановкой, ограничимся рассмотрением этой части цикла.

Как было установлено в § 2-8, рассматриваемой системе регулирования скорости свойственна статическая ошибка, которая при заданных пределах изменения нагрузки $M_{ст, max} - M_{ст, min} = 2\Delta M_{ст}$ в соответствии с рис. 2-28, а и (2-74) вызовет следующий разброс установившейся скорости движения:

$$\Delta\omega_{ст, max} = \omega_{ст, max} - \omega_{ст, min} = 2\Delta M_{ст} a_T T_{\mu T} / \beta T_M.$$

При настройке на технический оптимум

$$\Delta\omega_{ст, max} = \frac{2\Delta M_{ст}}{\beta} \frac{4 T_{\mu}}{T_M}, \quad (4-14)$$

где β — модуль статической жесткости естественной механической характеристики в разомкнутой системе УП — Д.

Таким образом, в связи со статизмом системы регулирования скорость электропривода в момент срабатывания датчика импульса на замедление ДИЗ в зависимости от нагрузки может отличаться на $\Delta\omega_{ст, max}$, которая для механизмов с небольшим приведенным моментом инерции ($T_M < 4 T_{\mu}$) может быть значительной.

Примем, что на входе системы установлен датчик интенсивности первого порядка. Тогда после получения импульса на замедление заданное значение скорости изменяется по закону

$\omega_3 = \omega_{3, нач} - \epsilon_{доп} t \neq \omega_{3, нач} - \epsilon_{доп} / p$. Полная установившаяся ошибка при линейном изменении задания при $M_{ст} = M_{ст, max}$ [4]:

$$\Delta\omega_{\Sigma, max} = -4\epsilon_{доп} T_{\mu} + \frac{M_{ст, max}}{\beta} \frac{4 T_{\mu}}{T_M}$$

и при $M_{ст} = M_{ст, min}$

$$\Delta\omega_{\Sigma, min} = -4\epsilon_{доп} T_{\mu} + \frac{M_{ст, min}}{\beta} \frac{4 T_{\mu}}{T_M}$$

Максимальная разность скоростей в процессе замедления с $\varepsilon = \varepsilon_{\text{доп}} = \text{const}$:

$$\Delta\omega_{\text{дин, max}} = \Delta\omega_{\Sigma, \text{max}} - \Delta\omega_{\Sigma, \text{min}} = \frac{2\Delta M_{\text{ст}}}{\beta} \frac{4 T_{\mu}}{T_{\text{м}}} = \Delta\omega_{\text{ст, max}}.$$

Такая же разность мгновенных значений скоростей при $M_{\text{ст, max}}$ и $M_{\text{ст, min}}$ сохраняется и в режиме установившегося движения при дотягивании. Зависимости $\omega = f(t)$ при замедлении

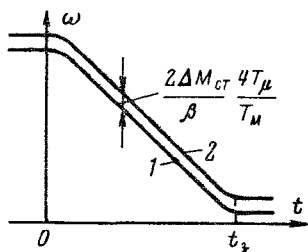


Рис. 4-9. Зависимости $\omega = f(t)$ при $M_{\text{ст}} = M_{\text{ст, max}}$ (кривая 1) и $M_{\text{ст}} = M_{\text{ст, min}}$ (кривая 2) в однократно-интегрирующей системе регулирования скорости.

с максимальной и минимальной нагрузками показаны на рис. 4-9 соответственно кривыми 1 и 2. Нетрудно видеть, что ошибка по пути замедления, которая должна отрабатываться на пониженной скорости, составит:

$$\Delta\varphi_{\text{з, max}} = \Delta\omega_{\text{ст, max}} t_3 = \frac{2\Delta M_{\text{ст}}}{\beta} \frac{4 T_{\mu}}{T_{\text{м}}} t_3,$$

а время дотягивания за счет этой ошибки увеличивается на величину

$$\Delta t_{\text{дот}} = \Delta\varphi_{\text{з, max}} / \omega_{\text{п, min}}.$$

Таким образом, наличие статизма рассматриваемой системы регулирования скорости может снижать производительность позиционного механизма. Поэтому обычно для таких электроприводов отказываются от настройки на технический оптимум и используют настройку контура скорости на симметричный оптимум [4]. При настройке на симметричный оптимум желаемая передаточная функция разомкнутого контура регулирования скорости имеет вид:

$$W_{\text{раз, c}} = \frac{1 + 4 T_{\mu, \text{ср}}}{4 T_{\mu, \text{ср}}} \frac{1/k_{\text{о, c}}}{2 T_{\mu, \text{ср}} (T_{\mu, \text{ср}} + 1)}.$$

Для контура регулирования скорости при наличии подчиненного контура регулирования тока суммарная некомпенсируемая постоянная может быть принята равной $T_{\mu, \text{с}} = a_{\text{т}} T_{\mu} =$

$= 2 T_{\mu}$, поэтому желаемая передаточная функция может быть записана так:

$$W_{\text{раз,с}} = \frac{1 + 8 T_{\mu} p}{8 T_{\mu} p} \frac{1/k_{0,с}}{4 T_{\mu} p (2 T_{\mu} p + 1)}. \quad (4-15)$$

Передаточная функция объекта регулирования скорости выражается и в данном случае соотношением (2-71), и требуемая при такой настройке передаточная функция регулятора скорости:

$$W_{\text{р,с}} = \frac{W_{\text{раз,с}}}{W_{0,р,с}} = \frac{1 + 8 T_{\mu} p}{\frac{k_{0,с} R_{\Sigma}}{k_{0,т} c T_M} 32 T_{\mu}^2 p^2}. \quad (4-16)$$

Таким образом, получена передаточная функция ИП-регулятора скорости РС, схема которого показана на рис. 4-10. Параметры ИП-регулятора скорости могут быть определены из соотношений:

$$T_{0,с,с} = R_{0,с,с} C_{0,с,с} = 8 T_{\mu};$$

$$T_{и,с} = R_{з,с} C_{0,с,с} = 32 T_{\mu}^2 \frac{k_{0,с} R_{\Sigma}}{k_{0,т} c T_M}.$$

При этом коэффициент обратной связи по скорости $k_{0,с}$ должен быть приведен к цепи задающего сигнала.

В соответствии с (4-15) изображение суммарной ошибки [4] при настройке на симметричный оптимум имеет вид:

$$\Delta \omega_{\Sigma}(\bar{p}) = \frac{\left[\omega_3(\bar{p}) + \frac{M_{ст}}{\beta T_{\mu} p} \right] 32 T_{\mu}^2 p^2 (2 T_{\mu} p + 1)}{32 T_{\mu}^2 p^2 (2 T_{\mu} p + 1) + 1}. \quad (4-17)$$

Соотношение (4-17) свидетельствует о том, что при настройке на симметричный оптимум за счет повышения коэффициентов усиления разомкнутого контура в низкочастотной области как установившаяся динамическая ошибка при линейном изменении задания $\omega_3(\bar{p}) = \varepsilon_{доп}/p$, так и ошибка по нагрузке равны нулю. Однако в связи с инерционностью ИП-регулятора скорости в начале процесса накапливается переходная динамическая ошибка, которая оказывается близкой установившейся динамической ошибке при линейном нарастании задания в системе с П-регулятором скорости. Эта накопившаяся ошибка отрабатывается системой с повышенным ускорением — скорость электропривода «догоняет» линейно нарастающий задающий

сигнал. Как следствие возникает перерегулирование по току и ускорению, достигающее 56% установившегося значения.

Характер рассмотренного процесса пуска показан на рис. 4-11, а. Столь значительное перерегулирование по ускорению нежелательно, так как ухудшает использование допустимого ускорения и тем самым может отрицательно сказываться на производительности установки. Известно, что перерегулирование по ускорению можно практически устранить введением на вход системы регулирования скорости фильтра с постоянной $T_{\phi} = 8 T_{\mu}$. При этом по управляющему воздействию система имеет показатели, соответствующие настройке на технический оптимум, что вызывает появление динамической ошибки при линейном нарастании задающего сигнала, однако ошибка по нагрузке при этом остается равной нулю.

Рассматривая рис. 4-9, можно заключить, что время дотягивания увеличивает лишь ошибка по статической нагрузке, динамическая ошибка не зависит от статической нагрузки и не вызывает разброса пути замедления. Поэтому в случаях, когда жестких требований в отношении ограничения рывка не предъявляется, система с настройкой на симметричный оптимум по нагрузке и на технический оптимум по управлению с задатчиком интенсивности первого порядка может обеспечить удовлетворительную точность отработки задаваемого закона движения.

В других случаях, особенно для электроприводов пассажирских скоростных лифтов, естественное ограничение рывка, свойственное системе с задатчиком интенсивности первого порядка, является недостаточным. Для формирования оптимальной тахограммы (см. рис. 4-8) в таких случаях прибегают к использованию задатчиков интенсивности второго порядка. Схема электропривода по системе ТП — Д с ИП-регуляторами тока и скорости и с задатчиком интенсивности $3И$ второго порядка приведена на рис. 4-10. Ограничение темпа нарастания и спадания заданного ускорения, повышение плавности переходного процесса приводит к существенному уменьшению перерегулирования по ускорению. Характер процесса пуска в системе с задатчиком интенсивности второго порядка и настройкой контура регулирования скорости на симметричный оптимум показан на рис. 4-11, б. Перерегулирование по ускорению при этом существенно снижается, поэтому необходимости введения фильтра не возникает и заданная тахограмма отрабатывается на участках равномерно ускоренного движения без динамической ошибки.

При применении рассмотренной типовой структуры электропривода для позиционных механизмов с автоматическим циклом работы точная остановка рабочего органа обеспечивается путем отключения задатчика интенсивности и включения на задающий вход регулятора скорости системы автоматического выравнивания, как это было изложено в § 4-4. Такое переключение на схеме рис. 4-10 производится контактами реле

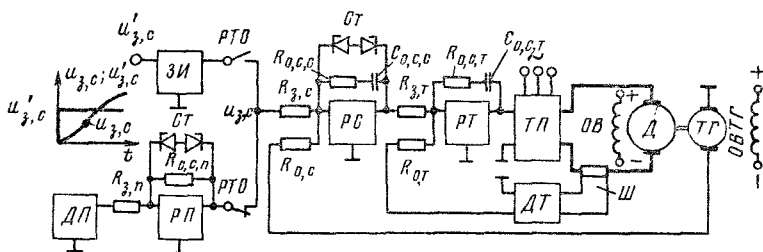


Рис. 4-10. Схема электропривода по системе ТП — Д для позиционного механизма с автоматизированным рабочим циклом.

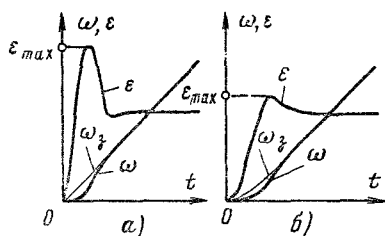


Рис. 4-11. Зависимости ω , $\varepsilon = f(t)$ в системе с задатчиком интенсивности первого (а) и второго (б) порядка.

точной остановки РТО. В результате переключения задающий вход регулятора скорости подключается к выходу регулятора положения РП, который управляется датчиком положения ДП, включенным по схеме, приведенной на рис. 4-5, а.

Структурная схема электропривода, соответствующая режиму выравнивания, представлена на рис. 4-12. В этой схеме входной сигнал датчика положения ДП представлен как разность задающего сигнала φ_3 , определяющего заданное значение пути, и сигнала обратной связи по положению (пути) φ , соответствующего истинному значению пути. Заданное значение пути определяется положением скобы ЗС (рис. 4-4, а), которое соответствует заданной остановочной координате, а истинное значение пути определяется текущим положением рабочего органа механизма (например, кабины подъемника), на котором установлены датчики ДТВ и ДТН. Таким образом, в рассматриваемом случае датчик положения ДП является источником

сигнала, пропорционального отклонению рабочего органа от координаты точной остановки.

Структурная схема на рис. 4-12 является схемой регулирования положения с подчиненными контурами регулирования тока и скорости. Пользуясь методом последовательной коррекции [4], определим передаточную функцию регулятора положения РП при настройке контура регулирования на технический опти-

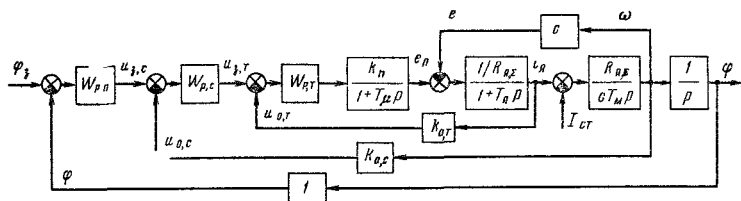


Рис. 4-12. Трехконтурная структура электропривода по системе ТП – Д с подчиненным регулированием тока, скорости и положения, оптимизированная методом последовательной коррекции.

мум. Объект регулирования положения представляет собой замкнутый контур скорости, настроенный на симметричный оптимум, и интегрирующее звено, преобразующее скорость в путь. Соответственно передаточная функция объекта регулирования положения имеет вид:

$$W_{o,п,п} = W_{зам,с} \frac{1}{p} = \frac{(k_{д,п}/k_{о,с})(1 + 8 T_{\mu} p)}{32 T_{\mu}^2 p^2 (2 T_{\mu} p + 1) + 8 T_{\mu} p + 1} \frac{1}{p}, \quad (4-18)$$

где $k_{д,п} = u_{к,п}/\Delta\varphi$ – коэффициент датчика положения ДП.

Пользуясь обычным допущением, примем $T_{\mu,п} = 8 T_{\mu}$. Тогда желаемая передаточная функция контура примет вид (связь по положению в соответствии с рис. 4-12 является единичной):

$$W_{раз,п} = \frac{1}{16 T_{\mu} p [32 T_{\mu}^2 p^2 (2 T_{\mu} p + 1) + 8 T_{\mu} p + 1]}. \quad (4-19)$$

Определим передаточную функцию регулятора положения

$$W_{p,п} = \frac{W_{раз,п}}{W_{o,п,п}} = \frac{k_{о,с}/k_{д,п}}{16 T_{\mu} (8 T_{\mu} p + 1)}. \quad (4-20)$$

Следовательно, регулятор положения в данном случае должен иметь передаточную функцию инерционного звена с коэффициентом усиления $k_{p,п} = \frac{k_{о,с}}{k_{д,п}} : 16 T_{\mu}$ и постоянной времени $8 T_{\mu}$. Появление в (4-20) инерционного звена обусловлено наличием соответствующего форсирующего звена с постоянной

$8 T_{\mu}$ в (4-18). Для получения настройки на технический оптимум его нужно компенсировать введением фильтра в $W_{p,п}$. Однако можно отступить от этой настройки и принять регулятор положения пропорциональным $W_{p,п} = k_{p,п}$. Так как форсирующее звено в (4-18) может только увеличить запас по фазе на частоте среза [4], при этом создаются условия для увеличения $k_{p,п}$, а следовательно, увеличения динамической точности регулирования положения. Эту возможность следует иметь в виду и в случае необходимости использовать. Однако отступление от традиционной настройки, соответствующей (4-19) и (4-20), требует проверки качества регулирования с помощью ЭВМ.

Из физических соображений ясно, что благодаря наличию ИП-регулятора скорости в рассмотренной схеме статическая ошибка позиционирования должна быть равна нулю — в установившемся режиме $\omega = 0$, напряжение на входе РС $u_{з,с} = 0$, $\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi = 0$. В системе с П-регулятором скорости при аналогичных условиях имеет место статическая ошибка [4]

$$\Delta\varphi_{ст} = \frac{32 T_{\mu}^2}{\beta T_M} M_{ст}, \quad (4-21)$$

причем при заданной точности позиционирования должно выполняться условие $\Delta\varphi_{ст, max} \leq \Delta\varphi_{доп}$.

Как было отмечено в § 4-4, в связи с наличием ограничения ускорения и рывка начальная скорость при входе в зону автоматического регулирования положения должна ограничиваться допустимым значением $\omega_{п, доп}$. Определим это значение скорости, полагая регулятор положения пропорциональным с $k_{p,п} = \frac{k_{о,с}}{k_{д,п}} : 16 T_{\mu}$. Выходное напряжение регулятора положения является сигналом задания скорости:

$$k_{p,п} k_{д,п} \Delta\varphi = u_{з,с} = k_{о,с} \omega_3, \quad (4-22)$$

Задаваемое на входе контура регулирования ускорение можно определить дифференцированием (4-22):

$$\varepsilon_3 = \frac{d\omega_3}{dt} = - \frac{k_{p,п} k_{д,п}}{k_{о,с}} \omega, \quad (4-23)$$

Максимальное ускорение электропривода ε_{max} имеет место в момент максимума тока i_a (рис. 4-13), которому соответствует скорость, обозначенная на рисунке ω_{max} . Так как при этом $\varepsilon_3 = -\varepsilon_{max}$, полагая $\varepsilon_{max} = \varepsilon_{доп}$, из (4-23) можно определить скорость ω_{max} :

$$\omega_{max} = k_{о,с} \varepsilon_{доп} / k_{p,п} k_{д,п}. \quad (4-24)$$

На участке нарастания тока среднее ускорение можно принять равным $\varepsilon_{\text{доп}}/2$, а время нарастания тока, определяемое быстроедействием второго контура, можно оценить значением $t_{\text{max}} = 4 T_{\mu}$. Тогда допустимую начальную скорость можно определить по формуле

$$\omega_{\text{п, доп}} = \omega_{\text{max}} + 4 \varepsilon_{\text{доп}} T_{\mu} = (k_{0, \text{с}}/k_{\text{р, п}} k_{\text{д, п}} + 4 T_{\mu}) \varepsilon_{\text{доп}} \quad (4-25)$$

Соответственно выходное напряжение регулятора положения должно быть ограничено значением $U_{3, \text{с, доп}} = k_{0, \text{с}} \omega_{\text{п, доп}}$.

При необходимости увеличения допустимой остановочной скорости $\omega_{\text{п, доп}}$ можно уменьшить коэффициент усиления регулятора положения $k_{\text{р, п}}$. Эта возможность вытекает непосредственно из (4-25). В ряде случаев, в частности в электроприводах скоростных лифтов, с этой целью используют регуляторы с параболической характеристикой [4].

При позиционной автоматизации типовых общепромышленных механизмов циклического действия обычно предусматривается автоматическое программное управление заданным положением механизма, которое обрабатывается либо шаговым электроприводом, либо следящим электроприводом с непрерывным цифровым или аналоговым контролем положения. Такое управление характерно для промышленных роботов и машин типа командных манипуляторов, когда требуется точная отработка дозированных перемещений. Особенности следящего электропривода, рассмотренные в курсе теории электропривода, и его технические реализации, изученные в курсе управления электроприводами, дают достаточное представление о структурах и свойствах таких электроприводов.

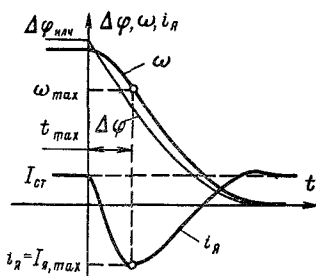


Рис. 4-13. Процесс автоматического выравнивания уровня точной остановки.

Пример 4-1. Произвести выбор системы электропривода для механизма передвижения специального мостового крана грузоподъемностью 125 т, управляемого автоматически по фиксированным пространственным координатам. Технические данные: $m_{\text{ном}} = 125 \cdot 10^3$ кг; $m'_0 = 150 \cdot 10^3$ кг; $v_p = 20$ м/мин; $\omega_p = 65$ 1/с; $D_k = 0,7$ м; $d_{\text{ц}} = 0,17$ м; $\mu = 0,08$; $f = 0,001$ м; $i_p = 75$; $\eta_m = 0,77$; $\Delta S_{\text{доп, ном}} = 5$ мм; погрешность ДТО $\Delta S_{\text{ДТО}} = 2$ мм; вращающиеся массы электропривода, приведенные к поступательному движению, $m_{\text{вп}} = 185000$ кг; $t_0 = 0,3$ с; $\Delta t/t_0 = 0,2$. По технологическим причинам необходима высокая плав-

кость протекания переходных процессов пуска и торможения с допустимым рывком $\rho_{\text{доп}} = 0,4 \text{ м/с}^3$ и строго ограниченным ускорением $\epsilon_{\text{зог}} = 0,1 \text{ м/с}^2$.

Наибольший статический момент (2-13):

$$M_{\text{ст, max}} = \frac{k_p (G'_0 + G_{\text{ном}}) (\mu d_{\text{ш}}/2 + f)}{i_p \eta_M} = \frac{2,5 (1470 \cdot 10^3 + 1230 \cdot 10^3) (0,08 \cdot 0,085 + 0,001)}{75 \cdot 0,77} = 910 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $G'_0 = m'_0 g = 150\,000 \cdot 9,81 = 1470 \cdot 10^3 \text{ Н}$;

$G_{\text{ном}} = m_{\text{ном}} g = 125\,000 \cdot 9,81 = 1230 \cdot 10^3 \text{ Н}$.

Наименьший статический момент:

$$M_{\text{ст, min}} = M_{\text{ст, max}} \frac{G'_0}{G'_0 + G_{\text{ном}}} = 910 \frac{1,47 \cdot 10^6}{(1,23 + 1,47) \cdot 10^6} = 495 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Следовательно,

$$\Delta M_{\text{ст}} = \frac{M_{\text{ст, max}} - M_{\text{ст, min}}}{2} = \frac{910 - 495}{2} = 208 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{ст0}} = \frac{M_{\text{ст, max}} + M_{\text{ст, min}}}{2} = \frac{910 + 495}{2} = 702 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Далее вычисляются параметры

$$m_{\text{max}} = m'_0 + m_{\text{ном}} + m_{\text{вр}} = (150 + 125 + 185) \cdot 10^3 = 460 \cdot 10^3 \text{ кг};$$

$$m_{\text{min}} = m'_0 + m_{\text{вр}} = (150 + 185) \cdot 10^3 = 335 \cdot 10^3 \text{ кг};$$

$$m_0 = \frac{m_{\text{max}} + m_{\text{min}}}{2} = \frac{(460 + 335) \cdot 10^3}{2} = 398 \cdot 10^3 \text{ кг};$$

$$\Delta m = \frac{m_{\text{max}} - m_{\text{min}}}{2} = \frac{(460 - 335) \cdot 10^3}{2} = 63 \cdot 10^3 \text{ кг};$$

$$\Delta F_{\text{ст}} = \Delta M_{\text{ст}} \omega_p / v_p = 208 \cdot 65 / 0,33 = 40,5 \cdot 10^3 \text{ Н};$$

$$F_{\text{ст0}} = M_{\text{ст0}} \omega_p / v_p = 702 \cdot 65 / 0,33 = 137 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

Принимаем, что $F_{\text{т0}} = 0,5 F_{\text{ст0}} = 0,5 \cdot 137 \cdot 10^3 = 68,5 \cdot 10^3 \text{ Н}$; $\Delta F_{\text{т}} = 0$. Тогда по (4-4) и (4-5):

$$a_0 = \frac{F_{\text{т0}} + F_{\text{ст0}}}{m_0} = \frac{(68,5 + 137) \cdot 10^3}{398 \cdot 10^3} = 0,516 \text{ м/с}^2;$$

$$\frac{\Delta a}{a_0} = \frac{\Delta F_{\text{т}} + \Delta F_{\text{ст}}}{F_{\text{т0}} + F_{\text{ст0}}} + \frac{\Delta m}{m_0} = \frac{40,5 \cdot 10^3}{(68,5 + 137) \cdot 10^3} + \frac{63 \cdot 10^3}{398 \cdot 10^3} = 0,351.$$

Расчетная допустимая неточность останковки

$$\Delta S_{\text{доп}} = \Delta S_{\text{доп, ном}} - \Delta S_{\text{ДТО}} = (5 - 2) \cdot 10^{-3} = 0,003 \text{ м}.$$

Требуемые параметры останковочной механической характеристики определяются из (4-7):

$$v_{\text{п0}} = \sqrt{k_1^2 a_0^2 t_0^2 + \frac{2k_2 a_0 \Delta S_{\text{доп}}}{k_{\text{п}}}} - k_1 a_0 t_0 =$$

$$= \sqrt{0,516^2 \cdot 0,3^2 k_1^2 + \frac{2 \cdot 0,516 \cdot 0,003 k_2}{1,05}} - 0,516 \cdot 0,3 k_1,$$

где

$$k_1 = \frac{\Delta v/v_{п0} + \Delta t/t_0}{2\Delta v/v_{п0} + \Delta a/a_0} = \frac{\Delta v/v_{п0} + 0,2}{2\Delta v/v_{п0} + 0,351};$$

$$k_2 = \frac{k_1}{\Delta v/v_{п0} + \Delta t/t_0} = \frac{k_1}{\Delta v/v_{п0} + 0,2};$$

$$k_{п} = 1,05$$

Задаваясь значениями $\Delta v/v_{п0}$, вычисляем k_1 , k_2 и $v_{п0}$:

$\Delta v/v_{п,0}$	0	0,1	0,2	0,3
$v_{п,0}$, м/с	0,04	0,028	0,02	0,0165
Δv , м/с	0	0,0028	0,004	0,00495
$D = v_p/v_{п,0}$	8,3	12,1	16,5	20

Допустимый динамический момент при пуске и замедлении:

$$M_{\text{дин,доп}} = J_{\Sigma, \text{мин}} \varepsilon_{\text{доп}} = \frac{m_{\text{мин}} a_{\text{доп}} \omega_p}{v_p} = \frac{335 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 65}{0,33} = 172 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Так как $M_{\text{дин,доп}} = 172 \text{ Н} \cdot \text{м} < 2\Delta M_{\text{ст}} = 416 \text{ Н} \cdot \text{м}$, при управлении скоростью необходимо при различных нагрузках крана поддерживать ускорение постоянным.

Полученные условия $D = 12$; $M_{\text{дин,доп}} < 2\Delta M_{\text{ст}}$; $\rho_{\text{доп}} = 0,4 \text{ м/с}^3$ в соответствии с изложенным выше определяют необходимость применения системы УП — Д со структурной схемой, показанной на рис. 4-10. Окончательный выбор варианта системы УП — Д из систем Г — Д, ТП — Д, ПЧ — АД осуществляется на основании технико-экономического расчета.

4-6. ОСОБЕННОСТИ СЛЕДЯЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КОПИРУЮЩИХ МАНИПУЛЯТОРОВ

В тех случаях, когда на электропривод копирующего манипулятора, осуществляющий перемещение по данной координате, возлагается только требование слежения за положением задающего механизма манипулятора, эта функция обеспечивается использованием обычного следящего электропривода. Однако во многих случаях при управлении копирующими манипуля-

торами предъявляется требование отражения усилия, создаваемого действиями оператора на исполнительном механизме манипулятора. Иными словами, требуется, чтобы оператор ощущал усилие на исполнительном механизме, воздействуя на задающий механизм. В таких случаях применяются обратимые следящие электроприводы, принцип действия и структура которых заслуживают особого рассмотрения [23].

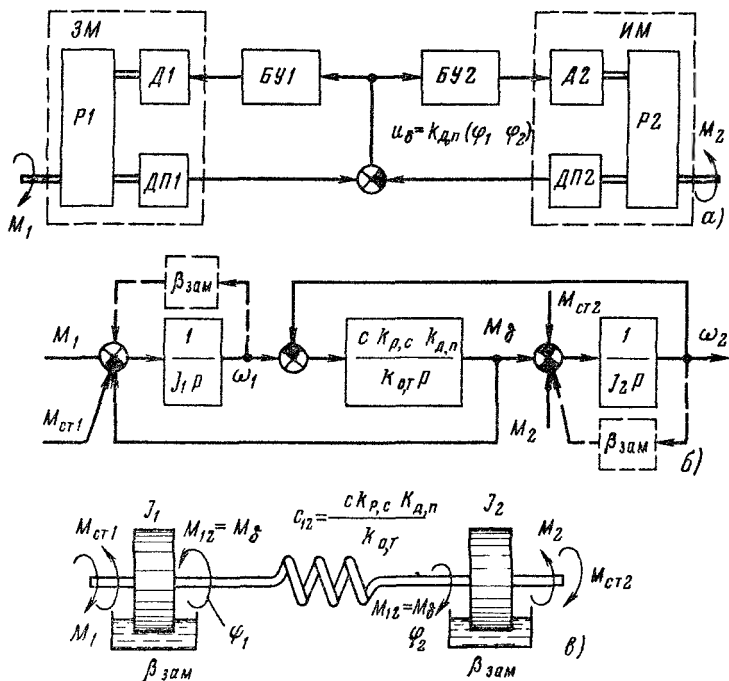


Рис. 4-14. Функциональная схема обратимого следящего электропривода (а), соответствующая структурная схема (б) и механический аналог (в).

Структурная схема обратимого следящего электропривода представлена на рис. 4-14, а. Он состоит из задающего **ЗМ** и исполнительного **ИМ** механизмов, причем каждый из них имеет редуктор (**Р1** и **Р2**), двигатель (**Д1** и **Д2**), а также датчик положения задающей или исполнительной оси (**ДП1** и **ДП2**). Электрические двигатели постоянного тока с независимым возбуждением получают питание от блоков управления **БУ1** и **БУ2**, которые содержат тиристорные преобразователи с быстродей-

ствующими контурами регулирования тока и скорости электропривода.

Для двухконтурной системы подчиненного регулирования тока и скорости, настроенной на технический оптимум (П-регулятор скорости), уравнение статической механической характеристики двигателя Д1 определяется соотношением

$$M_{дв1} = \frac{c_1 u_{3,т1}}{k_{о,т1}}, \quad (4-26)$$

где $M_{дв1}$ — момент, развиваемый двигателем;

c_1 — коэффициент ЭДС;

$k_{о,т1}$ — коэффициент обратной связи по току;

$u_{3,т1}$ — выходное напряжение регулятора скорости.

Так как

$$u_{3,т1} = k_{p,c1} (u_{3,c1} - k_{о,c1} \omega_1),$$

где $u_{3,c1}$, $k_{p,c1}$ и $k_{о,c1}$ — сигнал задания скорости, коэффициент усиления регулятора скорости и коэффициент обратной связи по скорости ω_1 двигателя Д1, (4-26) можно представить в виде

$$M_{дв1} = \frac{c_1 k_{p,c1} u_{3,c1}}{k_{о,т1}} - \frac{c_1 k_{p,c1} k_{о,c1}}{k_{о,т1}} \omega = M_{\delta 1} - \beta_1 \omega_1, \quad (4-27)$$

где $\beta_1 = c_1 k_{p,c1} k_{о,c1} / k_{о,т1}$ — модуль жесткости механической характеристики первого двигателя в замкнутой системе регулирования; $M_{\delta 1} = \beta_1 u_{3,c1} / k_{о,c1}$ — момент, развиваемый двигателем при $\omega_1 = 0$.

Эти соотношения соответствуют и двигателю Д2 при замене индекса 1 на индекс 2. Цепи задания скорости каждого двигателя подключены к выходу датчика рассогласования по положению между задающей и исполнительной осями, напряжение которого $u_{\delta} = k_{д,п} (\varphi_1 - \varphi_2)$. Следовательно, $u_{3,c1} = u_{3,c2} = u_{\delta}$ и с учетом (4-26) уравнения движения задающей и исполнительной осей имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} M_1 - M_{\delta 1} + \beta_1 \omega_1 - M_{ст1} &= J_1 p \omega_1; \\ M_{\delta 2} - \beta_2 \omega_2 - M_2 - M_{ст2} &= J_2 p \omega_2; \\ M_{\delta 1} = \frac{\beta_1 u_{\delta}}{k_{о,c1}} = \frac{k_{p,c1} k_{д,п} (\omega_1 - \omega_2) c_1}{k_{о,т1} p}; \\ M_{\delta 2} = \frac{\beta_2 u_{\delta}}{k_{о,c2}} = \frac{k_{p,c2} k_{д,п} (\omega_1 - \omega_2) c_2}{k_{о,т2} p}, \end{aligned} \right\} \quad (4-28)$$

где M_1 — момент, создаваемый рукой оператора на задающей оси;

M_2 — полезный момент, развиваемый на исполнительной оси;

$M_{сг1}, M_{сг2}$ — моменты потерь на трение в задающем и исполнительном механизмах.

Примем, что передаточные числа редукторов $P1$ и $P2$ одинаковы, а все параметры, входящие в (4-28), приведены к скорости исполнительной оси. Для большей наглядности анализа предположим, что требуется отражение усилия в масштабе 1:1: тогда $\beta_1 = \beta_2 = \beta_{зам}$, $k_{o,c1} = k_{o,c2}$. Как следует из (4-27), подбором коэффициента обратной связи по скорости жесткость механической характеристики $\beta_{зам}$ может быть установлена любой. Положим вначале $k_{o,c} = 0$, $\beta_{зам} = 0$ и при этом условии по (4-28) составим структурную схему данной электромеханической системы, показанную на рис. 4-14, б (цепи, показанные пунктиром, пока не учитываем). Анализ этой структурной схемы позволяет выявить наиболее важные особенности следящего электропривода с отражением усилий.

Рассматривая эту структурную схему, нетрудно установить ее полную аналогию со структурной схемой двухмассовой упругой механической системы, рассматриваемой в курсе теории электропривода [4], если положить жесткость упругой связи $c_{12} = \beta_{зам} k_{д,п} / k_{o,c}$ и вместо момента нагрузки упругой связи $M_{12} = c_{12} (\varphi_1 - \varphi_2)$ принять равные друг другу электромагнитные моменты двигателей $D1$ и $D2$ $M_\delta = \frac{ck_{p,c}k_{д,п}}{k_{o,г}} (\varphi_1 - \varphi_2)$.

Следовательно, обратимый следящий электропривод подобен дистанционной передаче момента через гибкий вал с сосредоточенными массами на концах, имеющими моменты инерции J_1 и J_2 (рис. 4-14, в). Этот аналог наглядно показывает, что при отсутствии потерь на трение $M_{сг1} = M_{сг2} = 0$ в статическом режиме $M_1 = M_2$, т. е. оператор для перемещения задающей оси должен приложить усилие, равное моменту полезной нагрузки на исполнительной оси. При этом важно, что система правильно отражает не только полезное усилие, но и его направление. Так, при подъеме груза оператор должен совершать работу, преодолевая момент сопротивления M_δ , а при спуске груза с установившейся скоростью он должен тормозить задающую ось, увлекаемую активным моментом груза через обратный следящий электропривод.

Точность отражения усилия даже в статических режимах ограничивается наличием моментов потерь на трение $M_{сг1}$ и

$M_{ст2}$, а в динамике дополнительно снижается наличием динамических моментов $M_{дин1} = J_1 p \omega_1$ и $M_{дин2} = J_2 p \omega_2$. Поэтому обычно для увеличения точности отражения усилия применяются компенсирующие связи по этим составляющим нагрузки.

Известно, что двухмассовая упругая система без учета внутреннего вязкого трения (рис. 4-14, б) представляет собой консервативное колебательное звено, в котором возникшие по какой-либо причине механические колебания не затухают. В обратимом следящем электроприводе высокое демпфирование механических колебаний обеспечивается выбором модуля жесткости механической характеристики каждого двигателя $\beta_{зам}$, при котором колебания затухают весьма быстро. Из курса теории электропривода известно, что зависимость момента двигателя с линейной механической характеристикой от скорости аналогична вязкому трению на валу двигателя, чем и обеспечивается эффект демпфирования. Соответственно на рис. 4-14, б для случая $\beta_{зам} \neq 0$ показаны пунктиром цепи, отражающие электромеханическую связь.

Рассматривая приведенную на рис. 4-15, а функционально-структурную схему обратимого следящего электропривода, можно заметить, что такой электропривод представляет собой совокупность двух следящих электроприводов — для прямого канала $W_{раз,п2}$ и для канала отражения усилия $W_{раз,п1}$. Такие системы, получившие название систем с активным отражением усилия, находят практическое применение, но их недостатком

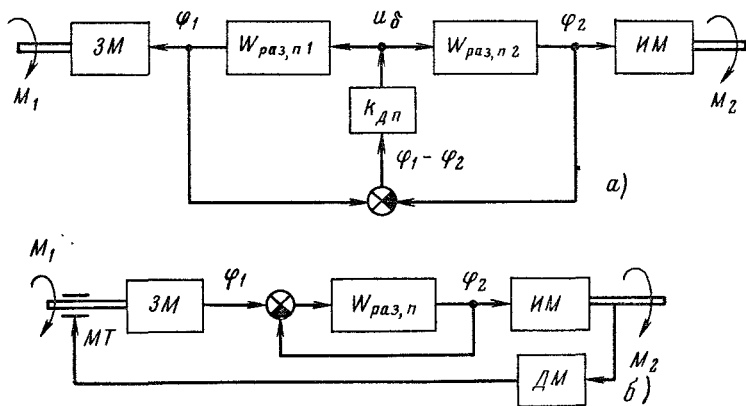


Рис. 4-15. Функционально-структурные схемы следящего электропривода с активным (а) и пассивным (б) отражением усилия.

является сложность, увеличенные габариты и стоимость. Поэтому в качестве более простого решения применяются следящие электроприводы копирующих манипуляторов с пассивным отражением усилия (рис. 4-15, б). Здесь обратный следящий тракт отсутствует; он заменен обратной связью по моменту нагрузки, воздействующей через датчик момента $ДМ$ на муфту трения, размещенную на задающей оси. Такая система способна создавать только тормозной момент на задающей оси, поэтому оператор не ощутит разницы между нагрузками при подъеме и при спуске груза. Отсутствие отражения направления усилия является существенным недостатком систем с пассивным отражением усилия, однако благодаря простоте они находят широкое применение [22, 23].

Глава пятая

ПРИМЕРЫ СХЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА УСТАНОВОК С АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОТРАБОТКОЙ ЦИКЛА

5-1. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК

Характерной группой общепромышленных механизмов, работающих в автоматических циклах, являются подъемные установки: лифты, шахтные скиповые и клетевые подъемники, канатные дороги маятникового типа и т. п. Общим важнейшим требованием, предъявляемым к электроприводу данных установок, является требование обеспечения заданной точности остановки. Как было показано в гл. 4, это требование при заданной рабочей скорости механизма и известных пределах изменения его нагрузки определяет необходимый диапазон регулирования скорости и условия ограничения ускорения и, таким образом, непосредственно влияет на выбор той или иной системы электропривода.

Низкая рабочая скорость тихоходных лифтов (до 0,5 м/с) позволяет обеспечить необходимую точность остановки простейшим способом: отключением двигателя от сети и наложением механического тормоза. Эти установки эксплуатируются в условиях малой высоты подъема и небольшой интенсивности работы. Переходные процессы пуска и торможения составляют по времени незначительную часть цикла. В результате этого изменение ускорения в зависимости от момента статической нагрузки практически не отражается на производительности та-

ких механизмов. Отмеченные особенности допускают применение простейшего и надежного вида привода с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Для привода тихоходных грузовых лифтов, отличающихся большей грузоподъемностью, а также тихоходных лифтов с большой частотой включений в час применяются асинхронные двигатели с фазным ротором. Реостатный способ пуска таких двигателей позволяет значительно снизить пусковые токи и облегчить работу питающей сети.

Для быстроходных лифтов (скорость движения кабины до 1,5 м/с) точность остановки уже не обеспечивается простым отключением двигателя от сети и наложением тормоза. Для таких лифтов требуется регулируемый электропривод, позволяющий получить пониженную скорость перед остановкой. В то же время изменение загрузки лифта не оказывает значительного влияния на его производительность и регулирования момента привода в процессах пуска и торможения не требуется. Поэтому в электроприводе современных быстроходных пассажирских лифтов получили распространение системы, в которых используются специализированные лифтовые двухскоростные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, обладающие повышенным скольжением и повышенной кратностью пускового момента ($M_{п}/M_{ном} = 2,2 \div 2,8$).

Указанные двигатели (рис. 5-1, а) имеют на статоре две независимые обмотки с соотношением числа пар полюсов 1:3 или 1:4. Рабочая скорость движения кабины лифта обеспечивается обмоткой большой скорости ОБС с малым числом пар полюсов — характеристика Б на рис. 5-1, б. При подходе ка-

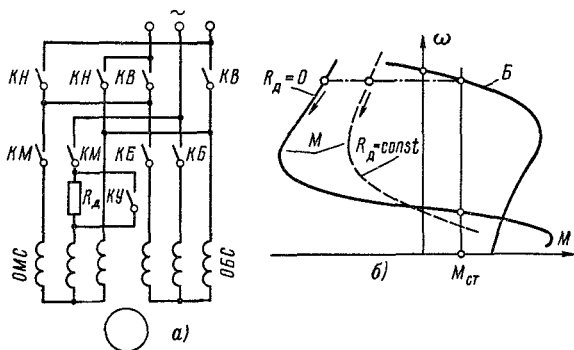


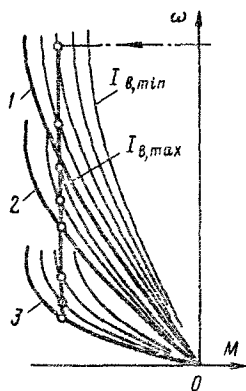
Рис. 5-1. Схема включения (а) и механические характеристики (б) двухскоростного лифтового асинхронного двигателя.

бины к этажу остановки эта обмотка отключается от сети контактором *КБ*, а контактор *КМ* подключает обмотку малой скорости *ОМС* с большим числом полюсов. Двигатель по характеристике *М* (рис. 5-1, б) переходит на пониженную скорость (0,3–0,5 м/с) дотягивания до уровня точной остановки, при достижении которого по сигналу датчика точной остановки *ОМС* отключается от сети и накладывается механический тормоз. В некоторых случаях для уменьшения ускорения электропривода при переходе на пониженную скорость в одной фазе *ОМС* предусматривается добавочное сопротивление R_d (рис. 5-1, а), снижающее критический момент двигателя в генераторном режиме (характеристика *М* при $R_d = \text{const}$ на рис. 5-1, б). После снижения скорости до остановочной это сопротивление в функции времени закорачивается контактом контактора *КУ*.

Наиболее жесткие требования в отношении поддержания постоянства ускорения и необходимого диапазона регулирования скорости предъявляются к электроприводу шахтных клетевых подъемных машин, скоростных лифтов, а также маятниковых канатных дорог. Эти установки отличает высокий уровень рабочей скорости движения подъемного сосуда или кабины (3,5–20 м/с для шахтных подъемников, более 1,5 м/с для скоростных лифтов и 2,5–12 м/с для маятниковых канатных дорог) и значительные пределы изменения момента статического сопротивления, определяемые степенью загрузки клетки или кабины, а в случае маятниковой дороги также изменяющимся углом наклона опорных канатов вдоль трассы. Необходимый диапазон регулирования скорости по условию точной остановки здесь обычно больше 10, и обеспечить заданную производительность перечисленных установок можно лишь применением замкнутой системы электропривода: Г – Д с различными схемами возбуждения или ТП – Д, получающей в последние годы все большее распространение. На уникальных шахтных подъемных установках с мощностью привода 15–20 тыс. кВт применяется система УРВ – Д (УРВ – управляемый ртутный выпрямитель). Для повышения точности остановки системы электропривода дополняются управлением по пути на участке замедления и по рассогласованию в зоне точной остановки.

Для скиповых шахтных подъемников вследствие дозированного наполнения скипов однородной породой отклонения момента статического сопротивления привода $M_{ст}$ обычно не превышают $\pm 15\%$. Стабильность $M_{ст}$ и сравнительно невысокая требуемая точность остановки скипа (200–300 мм) определяют целесообразность применения для привода скиповых подъем-

Рис. 5-2. Механические характеристики асинхронного двигателя скипового подъемника в режиме динамического торможения.



ников асинхронного двигателя с фазным ротором. Для замедления двигателя до пониженной скорости используется динамическое торможение. Постоянство ускорения в процессе замедления достигается автоматическим переключением ступеней роторного сопротивления и регулирования тока возбуждения двигателя. Соответствующие этому режиму механические характеристики показаны на рис. 5-2. В пределах каждой ступени сопротивления (семейства характеристик 1-3) ускорение поддерживается на требуемом уровне за счет увеличения тока возбуждения I_{θ} .

Задача получения пониженной скорости в отдельных случаях при относительно невысоких диапазонах регулирования ($D < 10$) успешно решается с помощью двух реостатных характеристик (1 и 2), охватывающих зону возможных изменений момента сопротивления (рис. 5-3). При снижении скорости в процессе динамического торможения до требуемого уровня двигатель вновь подключается к сети, имея в цепи ротора сопротивление, соответствующее характеристике 1. Если при этом $M_{ст} > M_{ст, min}$, то скорость двигателя снижается до некоторого граничного уровня $\omega_{п, min}$, при котором двигатель переключается на характеристику 2. Так как на этой характеристике двигатель развивает момент, превышающий $M_{ст, max}$, то его скорость возрастает в пределе до максимального граничного уровня $\omega_{п, max}$, при котором двигатель вновь переключается на характеристику 1. Работая в режиме переключений, привод обеспечивает среднюю пониженную скорость $\omega_{п}$. Так как путь дотягивания скиповой установки не превышает 1 м, то для его отработки оказывается достаточным всего нескольких переключений коммутирующей аппаратуры. Для снижения пульсаций скорости привода можно повысить частоту переключений характеристик, применив импульсный способ регулирования скорости с тиристорным ключом в роторной цепи.

В двухдвигательном варианте привода (рис. 5-4, а) можно получить пониженную скорость методом наложения характери-

стик, когда один из двигателей работает в двигательном режиме, а другой — в режиме динамического торможения (рис. 5-4, б). Следует, однако, иметь в виду, что двигатели в данном случае должны обладать повышенной перегрузочной способностью, так как в режиме дотягивания результирующий момент сопротивления подъемной лебедки преодолевается только одним двигателем, который должен дополнительно преодолеть и момент динамического торможения другого двигателя.

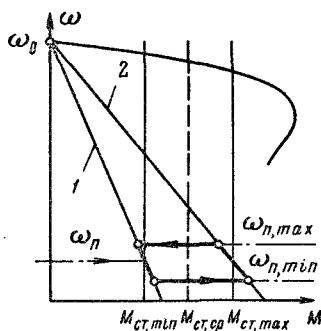


Рис. 5-3. Механические характеристики асинхронного двигателя скипового подъемника в режиме дотягивания.

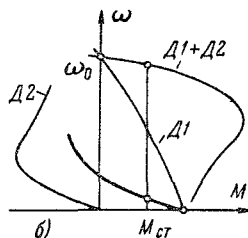
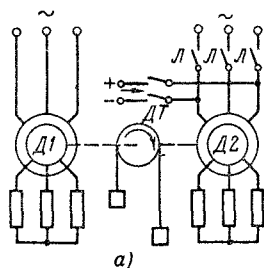


Рис. 5-4. Схема (а) и механические характеристики (б) двухдвигательного асинхронного привода.

При повышенных требованиях к жесткости механической характеристики в зоне пониженных скоростей находит применение схема питания асинхронного двигателя Д1 от автономного преобразователя частоты (рис. 5-5). Специальный синхронный генератор СГ, рассчитанный на сниженные рабочие значения напряжения и частоты, приводится во вращение асинхронным двигателем Д2. Обмотка возбуждения СГ питается от полупроводникового управляемого возбудителя УВ. Частота СГ $f_{с,г}$ должна соответствовать требуемому уровню

пониженной скорости $\omega_{\text{п}}$, т. е. должна быть уменьшена в отношении

$$f_{\text{с,г}} \approx \frac{\omega_{\text{п}}}{\omega_{\text{р}}} f_{\text{с}},$$

где $f_{\text{с}}$ — частота питающей сети;

$\omega_{\text{р}}$ — рабочая угловая скорость асинхронного двигателя.

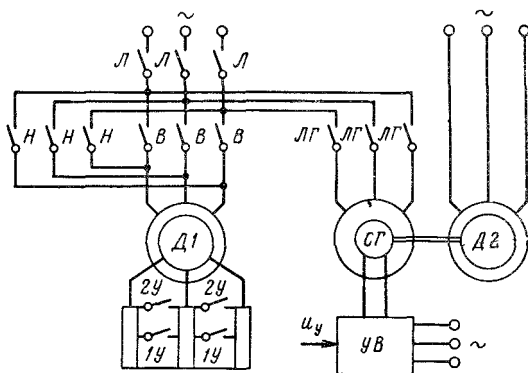


Рис. 5-5. Схема включения асинхронного электропривода с автономным преобразователем частоты для режима пониженной скорости.

Для сохранения перегрузочной способности асинхронного двигателя в режиме дотягивания напряжение $СГ$ должно быть также снижено:

$$U_{\text{с,г}} \approx \frac{\omega_{\text{п}}}{\omega_{\text{р}}} U_{\text{с}},$$

где $U_{\text{с}}$ — напряжение питающей сети.

Установленная мощность $СГ$ меньше установленной мощности $Д1$ приблизительно в том же отношении $\omega_{\text{п}}/\omega_{\text{р}}$.

В заключение следует отметить, что применение той или иной системы электропривода диктуется не только способностью привода выполнить технологические требования установки, но и технико-экономическими соображениями. Так, для скипового подъемника с мощностью привода, превышающей 1000 — 1200 кВт, система Г — Д оказывается целесообразной для применения и при диапазонах регулирования скорости, меньших 10.

5-2. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОПОЗИЦИОННЫМИ ПОДЪЕМНИКАМИ

Многопозиционные механизмы могут занимать множество возможных фиксированных положений в общем случае в трех пространственных координатах. Возможные перемещения в рамках фиксированных положений также многообразны, что обуславливает разнообразие возможных циклов работы, автоматизация которых представляет собой сложную проблему. В отличие от однопозиционных механизмов, для которых остановка и последующее движение заранее и однозначно определены, для многопозиционных механизмов после каждой остановки приходится решать логическую задачу о выборе последующего перемещения.

К характерной и многочисленной группе многопозиционных механизмов общепромышленного применения относятся подъемные установки с промежуточными остановками вдоль трассы перемещения. Это — пассажирские и грузовые лифты, подъемники шахт с промежуточными горизонтами, а также маятниковые канатные дороги с промежуточными станциями. Все фиксированные положения подъемных кабин этих установок расположены на одной линии, что вносит определенное облегчение при реализации их автоматической работы. В функциональную задачу схем управления многопозиционными подъемниками входит формирование программы на перемещения в рамках цикла, а также выработка командных сигналов, воздействующих на электропривод с целью реализации сформированной программы.

Принципы построения схем в целом сходны для разных многопозиционных подъемников. Некоторые различия определяются конструктивными и технологическими особенностями установок, степенью участия человека в управлении ими. Так, для подъемников шахт с промежуточными горизонтами и канатных дорог с промежуточными станциями часть логических функций управления работой этих установок возлагается на оператора, что упрощает структуру схем. Наиболее полная автоматизация характерна для современных пассажирских лифтов, на примере которого и рассмотрим узлы схем управления многопозиционными подъемниками.

Схема управления лифтом включает в свой состав следующие основные узлы: контроля положения кабины в шахте; автоматического выбора направления движения; торможения; точной остановки; автоматического открывания и закрывания дверей; защиты.

Командные сигналы, задающие программу движения кабины, разделяются на два типа: «приказы», поступающие из кабины, и «вызовы», поступающие с этажных площадок. Команды подаются с помощью кнопок, расположенных соответственно в кабине и на этажных площадках. В зависимости от реакции на команды и способа их отработки различаются схемы раздельного и собирательного управления. При раздельном принципе управления схема воспринимает и обрабатывает только одну команду и во время ее выполнения не реагирует на другие приказы и вызовы. Такая схема наиболее проста в реализации, но ограничивает возможную производительность лифта и поэтому применяется лишь для лифтов жилых домов высотой до девяти этажей с относительно небольшим потоком пассажиров.

При собирательном принципе управления схема воспринимает одновременно несколько команд и выполняет их в определенной очередности, обычно в порядке следования этажей. Собирательное управление может быть частичным, с определенными ограничениями, и полным, без каких-либо ограничений. Например, схема собирательного управления на спуск может воспринимать только попутные вызовы на спуск и не реагирует на вызовы при подъеме. Другой вариант такой схемы воспринимает без ограничений вызовы на спуск при любом направлении движения с последующим их исполнением. Собирательное управление обеспечивает большую производительность лифта, поэтому оно широко применяется в высотных жилых домах, административных и учебных зданиях, гостиницах, где имеют место большие потоки пассажиров. Наиболее полно собирательное управление реализуется в групповых схемах управления несколькими лифтами. Для таких лифтовых установок может составляться гибкая программа работы, при которой в зависимости от изменения пассажиропотока во времени свободные кабины лифтов находятся на этажах максимального спроса, например в утренние часы на первом, в конце рабочего дня на верхнем.

Основным узлом, обеспечивающим автоматическую работу лифта, является узел контроля положения кабины в шахте. Устройство, выполняющее эту функцию, называется селектором. К простейшему типу селектора относятся размещаемые в шахте на уровне каждого этажа трехпозиционные перекидные этажные переключатели ЭП, переключаемые с помощью специальной скобы (отводки), укрепленной на кабине. Положение переключающего рычага ЭП дает информацию о месте положения кабины (рис. 5-6). При прохождении кабины через этаж

скоба перекидывает рычаг ЭП и переключает его контакты, которые осуществляют соответствующее управляющее действие в схеме. Длина линейного участка скобы $l_{ск}$ рассчитывается из условия двойного пути торможения лифта, поскольку ЭП переключается одной и той же скобой при подходе кабины к этажу как снизу, так и сверху.

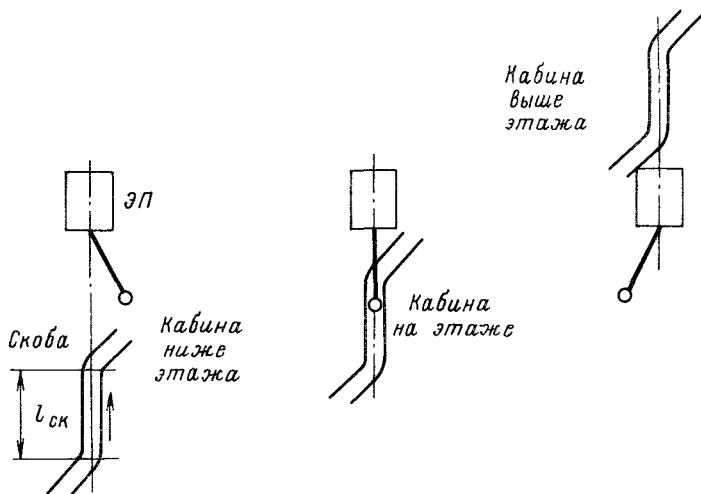


Рис. 5-6. Контроль положения кабины в шахте с помощью этажного переключателя.

На рис. 5-7 показан узел автоматического выбора направления с помощью этажных переключателей. Кроме этажных переключателей в узел входят этажные реле ЭР, контакторы направления движения вверх $KВ$ или вниз $KН$, включающие двигатель на соответствующее направление вращения, а также блокирующие контакты пола кабины $ПК1$, $ПК2$. Кабина находится на i -м этаже, контакторы $KВ$ и $KН$ отключены. При нажатии на кнопку вызова $КнВк$ или приказа $КнПк$ какого-либо, например k -го этажа, получает питание реле ЭР $_k$ этого этажа. Контакт ЭР $_k$ подает питание на шину ШВ контактора $KВ$, если этаж назначения и вызова выше i -го этажа, или на шину ШН контактора $KН$, если выбран нижний относительно i -го этаж. Кнопки $КнВк$ или $КнПк$ блокируются контактом ЭР $_k$ и одним из замкнувшихся контактов $KВ$ или $KН$. Если в кабине находится пассажир, то контакт пола $ПК1$ разрывает цепь вызывных кнопок, а контакт $ПК2$ подключает цепь питания кнопок приказов.

Достоинство этажного переключателя — простота схем

управления, построенных с его использованием. Однако работа этажного переключателя сопровождается шумом. Срок службы его ограничен и резко уменьшается с ростом скорости движения лифта, поэтому этажные переключатели применяются в основном в тихоходных и некоторых быстроходных лифтах с рабочими скоростями до 0,71 м/с.

Расширить возможности путевого принципа контроля положения кабины можно с помощью копирующих аппаратов — механических селекторов, широко применяемых в зарубежной практике. Компактный, размещенный в машинном зале копираппарат механически соединен с кабиной цепью или тросиком и в масштабе примерно 1:50 повторяет движение кабины в круговой развертке, выполняя с помощью кулачковых контактов те же операции переключения, что и этажные переключатели. Копираппараты работают плавно и бесшумно и применяются на лифтах со скоростью движения кабины до 1 м/с. Однако косвенный контроль положения кабины через механические передачи является недостатком рассмотренного типа селектора, в конструкции которого необходимо предусматривать меры, не допускающие нарушение его синхронизации, например, из-за проскальзывания соединительного тросика. Кроме того, уменьшенный масштаб воспроизводимого копираппаратом движения кабины усложняет выполнение точной остановки. Поэтому при скорости движения кабины более 1 м/с механические селекторы работают ненадежно.

Для скоростных и работающих в интенсивном режиме быстроходных лифтов применяют электрические селекторы с бесконтактными датчиками положения кабины. Наибольшее применение в схемах отечественных лифтов получили индуктивные датчики, представляющие собой катушку переменного тока, намотанную на шихтованном П-образном стальном сердечнике (рис. 5-8, а). Датчики располагаются в шахте на уровне

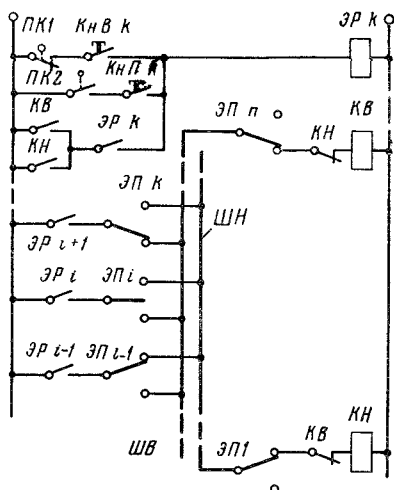


Рис. 5-7. Схема узла автоматического выбора направления движения на этажных переключателях.

этажных площадок так, что при движении лифта их магнитопроводы поочередно замыкаются (без касания) стальной скобой, укрепленной на кабине. Нагрузкой датчика служит обмотка реле или согласующее сопротивление логического элемента. При разомкнутом магнитопроводе индуктивное сопротивление катушки датчика мало и напряжение питания почти полностью

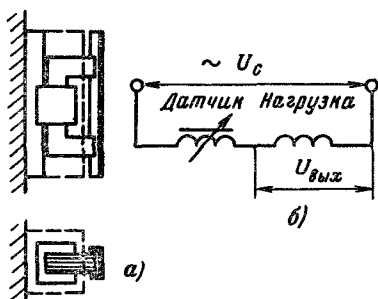


Рис. 5-8. Индуктивный датчик (а) и схема его включения (б).

прикладывается к нагрузке $U_{\text{вых}} \approx U_c$ (рис. 5-8, б). При замкнутом магнитопроводе индуктивное сопротивление катушки велико и $U_{\text{вых}} \approx 0$.

Селекторы с использованием индуктивных датчиков строятся в двух исполнениях: с применением контактных реле (релейные селекторы) и на бесконтактных логических элементах (бесконтактные селекторы). В основу построения обоих типов селектора кладется одна и та же исход-

ная диаграмма его работы, представленная на рис. 5-9. Индуктивные датчики селекции ДС1, ДС2, ДС3 ... (с номером, соответствующим порядковому номеру этажа) вырабатывают сигналы соответственно ИС1', ИС2', ИС3' ..., которые в терминологии цифровой техники характеризуются двумя значениями: 0 — при положении кабины в зоне данного датчика и 1 — во всех других положениях кабины. Если осуществить инверсию полученных сигналов, то положению кабины в зоне действия датчика будет соответствовать сигнал 1, а при любом другом положении — сигнал 0. Таким образом, при перемещении кабины будут поочередно появляться импульсы селекции ИС1, ИС2, ИС3 ... (на рис. 5-9 выделены штриховкой).

Расширение импульсов селекции на расстояние между соседними этажами (сигналы С1, С2, С3 ... на рис. 5-9) позволяет непрерывно следить за перемещением кабины с точностью до межэтажного расстояния. Если возбужденное состояние сигнала селекции сохранить и на движение в обратном направлении, то появляется дополнительная информация о направлении движения. Действительно, пусть известно, что кабина движется между вторым и третьим этажами. Тогда кабина движется вверх, если сигнал С2 имеет значение 1, и вниз, если единичное значение имеет сигнал С3. Таким образом, с помощью сигналов се-

лекции $C1$, $C2$ и т. д. весьма полно выполняется функция контроля положения кабины.

Релейный вариант реализации рассмотренной диаграммы работы селектора приведен на рис. 5-10. Последовательно с катушками индуктивных датчиков $ДС1 - ДСп$, где n — число этажей, включены реле импульсов селекции $РИС1 - РИСп$. Им-

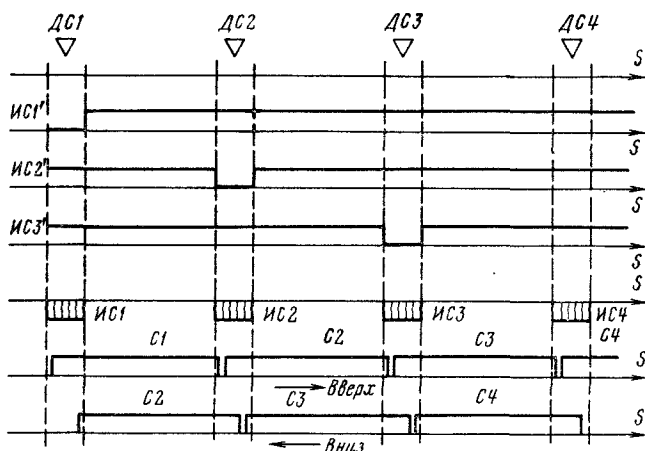


Рис. 5-9. Исходная диаграмма работы датчиков селекции.

пульсы селекции $ИС1 - ИСп$ создаются при замыкании размыкающих контактов соответствующих $РИС$. Эти импульсы включают катушки реле селекции $РС1 - РСп$. Включившись, реле $РС$ своим замыкающим контактом блокирует размыкающий контакт $РИС$ и сохраняет включенное состояние вплоть до следующего по ходу движения этажа. Например, если кабина находится на первом этаже, то включено реле $РС1$. При подходе ко второму этажу теряет питание $РИС2$ и отключает $РС1$. Размыкающий контакт $РИС2$ включает следующее реле селекции $РС2$, которое отключится контактом $РИС3$ при подходе кабины к третьему этажу и т. д.

При движении кабины вниз $РС$ отключаются контактами $РИС$, расположенными справа от катушек $РС$ (рис. 5-10, б). В соответствии с работой реле селекции будут загораться сигнальные лампы $Л1 - Лп$, указывающие на световом табло положение кабины (рис. 5-10, в).

На рис. 5-11, а показана схема узла автоматического выбора направления движения для варианта частичного собирательно-управления по попутным вызовам при движении вниз. В све-

ме используются кнопки приказов *КнП* и вызовов *КнВ* с залипанием (с удерживающим электромагнитом), сохраняющие нажатое состояние до конца выполнения команды. Благодаря этому запоминание поданной команды осуществляется самой кнопкой, и отпадает надобность в отдельном запоминающем приборе, а утопленное положение толкателя кнопки извещает

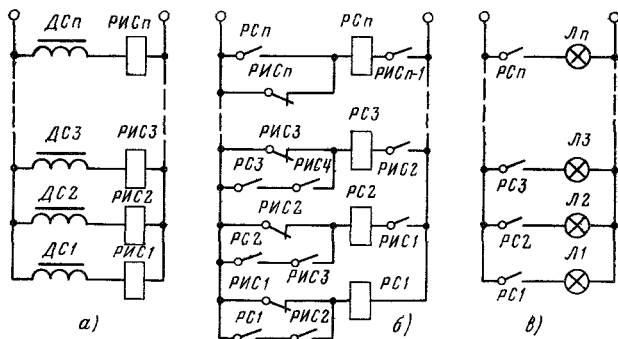


Рис. 5-10. Схемы включения реле импульсов селекции (а), реле селекции (б) и сигнальных ламп (в).

пассажира о регистрации приказа или вызова. Возврат кнопки в исходное положение производится шунтированием либо отключением катушки удерживающего электромагнита.

Пусть кабина находится на i -м этаже. При этом все замыкающие контакты *РИС* замкнуты за исключением *РИС_i*. Если команда назначает движение к вышерасположенному этажу, например к $(i + 1)$ -му, то с плюсовых шин *ШКП* или *ШКВ* через замкнутые кнопки *КнП_{i+1}* или *КнВ_{i+1}* подается питание на реле управления движением вверх *РУВ*. Это реле включается и обеспечивает выбранное направление движения. Цепь катушки реле управления движением вниз *РУН* отключается сначала контактами *РИС_i*, а затем при движении вверх разомкнувшимся контактом *РУВ*. Если, напротив, была нажата кнопка *КнП_{i-1}* или *КнВ_{i-1}*, соответствующая нижерасположенному этажу, то сможет включиться только реле *РУН*. При подходе к этажу назначения цепь *РУВ* разрывается контактами *РИС_{i+1}*, а *РУН* — контактами *РИС_{i-1}*.

С узлом выбора направления связан узел замедления, в который входит цепь блокировок и реле замедления *РЗ*. При подходе кабины к этажу назначения замыкается соответствующий размыкающий контакт *РИС* и через замкнутую кнопку *КнП* или *КнВ* в цепь блокировок включается реле замедления *РЗ*. Ре-

ле *РЗ* отключает контактор большой скорости *КБ* и переводит привод в режим дотягивания до уровня точной остановки. Если при движении вниз было зарегистрировано несколько попутных вызовов, то *РУН*, получая питание через соответствующие кнопки *КнВ*, отключится только после выполнения последнего, самого нижнего вызова. Контакт *РУН* в шине вы-

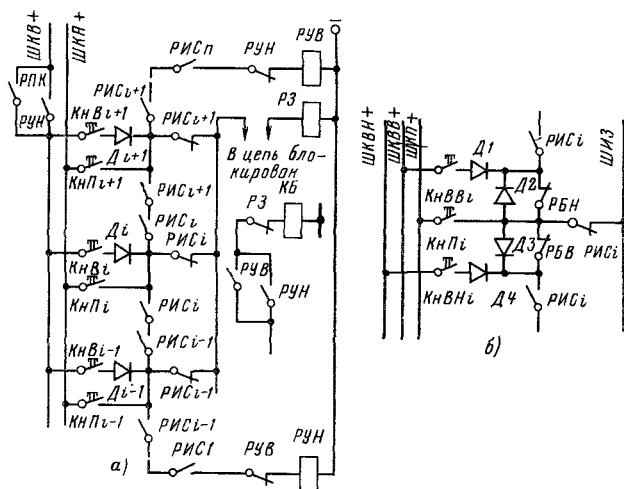


Рис. 5-11. Схема узла выбора направления движения при собирательном управлении по вызовам вниз (а), вверх и вниз (б).

званных кнопок и диоды *Д₁ - 1 - Д₁ + 1* блокируют схему от принятия вызовов при движении занятой кабины вверх.

При подъеме порожней кабины по вызову питание шины *ШКВ* обеспечивается замкнутым контактом реле контакта пола *РПК*. Однако при этом блокировками разомкнута цепь питания реле *РЗ*. Поэтому при наличии нескольких вызовов кабина движется вверх без остановки до этажа наивысшего вызова, где при размыкании соответствующего контакта *РИС* теряет питание *РУВ* и отключает контактор *КБ*.

При полном собирательном управлении по вызовам при движении как вверх, так и вниз на этажных площадках устанавливаются по две вызывные кнопки для соответствующих направлений движения *КнВВ₁* и *КнВН₁* (рис. 5-11, б). Кнопки вызова вверх *КнВВ* получают питание от шины *ШКВВ*, а кнопки вызова вниз *КнВН* — от *ШКВН*. Взаимосвязь цепей кнопок осуществляется разделительными диодами *Д₁ - Д₄*. Выбор направ-

вления движения осуществляется автоматически аналогично описанному для схемы рис. 5-11, а. Дополнительно включенные в схему размыкающие контакты блокировочных реле направлений *РВВ* и *РВН* блокируют схему после выбора направления от непопутных вызовов. Если сработало реле *РУВ*, то контакт *РВВ* размыкается и исключает воздействие на схему кнопок *КНВН*.

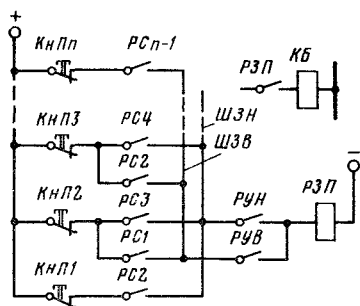


Рис. 5-12. Схема узла замедления по приказам на реле селекции.

при скорости в 1,5 м/с и среднем замедлении 1,5 м/с² требуемая длина скобы составит $2 \cdot \frac{1,5^2}{2 \cdot 1,5} = 1,5$ м. Увеличение размера скобы ограничивает применение узла замедления, построенного указанным способом, лишь для лифтов со скоростью движения меньше 1,5 м/с.

Для лифтов с большей рабочей скоростью сигнал на остановку на i -м этаже можно подавать с датчика ДС предшествующего по ходу движения этажа, т. е. с $ДС_{i-1}$ при движении вверх и с $ДС_{i+1}$ при движении вниз. Реализация такого принципа построения узла замедления возможна, если межэтажное расстояние с достаточным запасом превышает путь торможения лифта. Для согласования момента начала торможения с работой ДС вводится соответствующая задержка по времени сигнала селекции. Так как межэтажная высота в современных жилых и административных зданиях составляет 2,5–3,5 м, то в среднем рабочая скорость лифтов с таким узлом замедления не может превышать значение $v_D \approx \sqrt{2 \cdot 1,5 \cdot 3} = 3$ м/с.

На рис. 5-12 приведена схема узла замедления по приказам, выполненного по указанному принципу с использованием реле селекции $PC1 - PCn$. Размыкающие контакты кнопок приказа

Узел замедления, реализуемый в релейном варианте селектора, может выполняться различно. Так, в схеме рис. 5-11, а команда на замедление поступает от датчика селекции ДС этажа назначения. Ширина зоны действия ДС, ограниченная вертикальными штриховыми линиями на рис. 5-9, определяется в этом случае двойным путем торможения. Чем выше рабочая скорость лифта, тем больше путь торможения и длиннее скоба, шунтирующая датчик. Так,

КнП1 — КнПн подают питающее напряжение на шины замедления вниз *ШЗН* и вверх *ШЗВ* через замыкающие контакты реле селекций *РС1 — РСп*. При движении кабины, например, вверх поочередно работают реле *РС1, РС2, РС3* и т. д. На участке движения от первого до второго этажа реле замедления по приказам *РЗП* получает питание через контакты *КнП2, РС1, РУВ*; на участке движения от второго этажа до третьего — через *КнП3, РС2, РУВ* и т. д. Возбужденное состояние *РЗП* обеспечивает включенное состояние контактора *КБ* и тем самым режим большой скорости. Если одна из кнопок, например *КнП3*, нажата, то, как видно из схемы, цепь *РЗП* разрывается при подходе кабины к четвертому этажу при движении вниз и ко второму этажу — при движении вверх. Следует заметить, что рассмотренный способ построения узла замедления вносит дополнительные трудности в реализацию режима поэтажного разъезда, для которого требуется определенное перестроение схемы.

Существенным недостатком релейных селекторов является большое количество контактов, что приводит в процессе эксплуатации к отказам в работе схемы. Отыскание неисправности в сложной релейной схеме представляет собой трудную задачу и требует квалифицированного персонала. Стремление устранить недостаток релейных селекторов привело к созданию бесконтактных схем управления с использованием логических элементов современных серий. Функциональные узлы схемы управления на логических элементах могут быть построены формальным транспонированием релейных, контактных вариантов узлов на бесконтактные. В ряде случаев так и поступают, когда решается задача модернизации схемы, т. е. перевод ее на бесконтактный вариант. Однако во вновь разрабатываемых системах управления можно учесть специфические особенности логических элементов, используя принципы и приемы цифрового управления.

Рассмотрим в качестве примера построение основных узлов схемы управления скоростным лифтом ($v_p = 2$ м/с), разработанной ВНИИЭлектропривод. В схеме применяется способ многотактового опроса, позволяющий сократить число аппаратов и наилучшим образом использовать цифровую систему управления. Местоположение кабины определяется с помощью шестиразрядного двоичного датчика, позволяющего применять схему в зданиях с количеством этажей до 40. Шесть индуктивных датчиков расположены на крыше кабины и шунтируются установленными в шахте шестью стальными скобами так, что от этажа к этажу соответственно меняются цифры в разря-

дах, однозначно определяя положение кабины. Седьмой датчик, установленный на кабине, является датчиком точной остановки.

Узел тактового опроса состоит из тактового генератора (мультивибратора), линий задержки, блоков опроса, каждый из которых рассчитан на последовательный опрос четырех этажей. Частота тактов опроса — 20 Гц, последовательность опроса состояния схемы — от наивысшего этажа к первому. Результаты

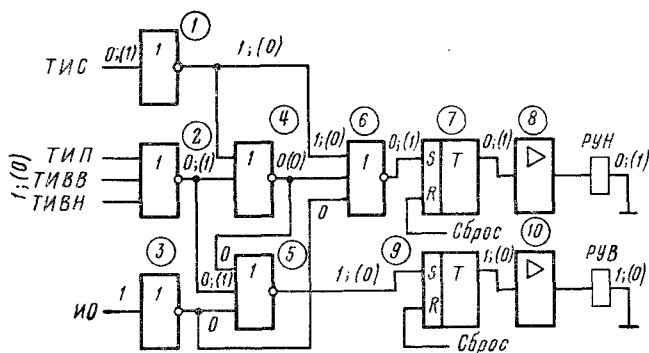


Рис. 5-13. Схема узла выбора направления движения на логических элементах с многотактовым опросом.

опроса поступают в узел выбора направления движения, если кабина неподвижна, или в узел замедления, если кабина движется.

На рис. 5-13 приведена схема узла выбора направления движения на логических элементах. На входные элементы 1, 2, 3 типа ИЛИ — НЕ подаются полученные тактовым опросом импульсы селекции *ТИС*, импульсы приказов *ТИП* и вызовов вверх *ТИВВ* и вниз *ТИВН*, а также импульсы опроса *ИО*. Если имеются приказы и вызовы, соответствующие этажам, расположенным выше местоположения кабины, то вначале появятся единичные импульсы на входе элемента 2, а сигнал *ТИС* на входе элемента 1 останется нулевым. В такт опроса на входе элемента 3 будет 1. Из схемы видно, что на входе триггера 7 появится 0, а триггера — 9 — 1. Сработает реле *РУВ*, определяющее движение вверх. Состояние триггеров сохраняется до следующей остановки кабины, когда на вторые входы триггеров подаются сигналы сброса, возвращающие их в исходное положение. Если команды приказов и вызовов соответствуют этажам, расположенным ниже местоположения кабины, то при опросе вначале появится сигнал селекции *ТИС*, а сигналы *ТИП*,

ТИВВ, *ТИВН* останутся нулевыми. Нетрудно проследить по схеме, что состояние ее изменится (цифры в скобках), и сработает реле направления движения вниз *РУН*.

В заключение отметим, что окончательные операции воздействия на схему электропривода даже при бесконтактном селекторе возлагаются на релейно-контакторную аппаратуру. Контактное реле позволяет одним своим рабочим тактом выполнять одновременно большое число переключений в различных электрических цепях. Это достоинство реле дает возможность упростить схемы, выполняющие защитные и блокировочные функции, а также обеспечить согласование логических бесконтактных узлов с системой электропривода.

К пассажирским лифтам предъявляются весьма строгие требования в отношении надежности работы и безопасности пользования лифтом. Причиной несчастных случаев может явиться обрыв канатов кабины или противовеса, превышение скорости движения кабины выше допустимой, движение кабины при открытых дверях, перегрузка кабины, ослабление натяжения канатов ограничителя скорости и т. п. Поэтому все лифты снабжаются различными механическими и электрическими устройствами, гарантирующими безопасность обслуживания пассажиров. Наиболее характерные устройства безопасности рассматриваются в следующем параграфе на примере типовой схемы управления быстросходным лифтом.

5-3. ЭЛЕКТРОПРИВОД ЛИФТА С ДВУХСКОРОСТНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

На рис. 5-14 представлена типовая электрическая схема электропривода пассажирского лифта с автоматическим приводом дверей и неподвижным полом. Лифт предназначен для обслуживания жилых зданий высотой до девяти этажей (на рисунке схема дана в сокращении до четырех этажей). Номинальная грузоподъемность лифта 320 кг, рабочая скорость движения кабины 0,71 м/с.

Напряжение питания подается на схему через вводное устройство ВУ, снабженное рубильником и конденсаторным фильтром от радиопомех. Для защиты электродвигателей от токов короткого замыкания и перегрузки предусмотрены автоматические выключатели *ВА1* и *ВА2*. Цепи управления питаются постоянным напряжением 110 В от выпрямителя *ВП* и трансформатора *Тр1*, а цепи сигнализации — переменным напряжением 24 В от трансформатора *Тр3*. Защита цепей упра-

вления и сигнализации осуществляется предохранителями $Пр1 - Пр4$.

Схема построена по принципу раздельного управления с селектором, выполненным на перекидных этажных переключателях ЭП, каждый из которых имеет четыре пары контактов.

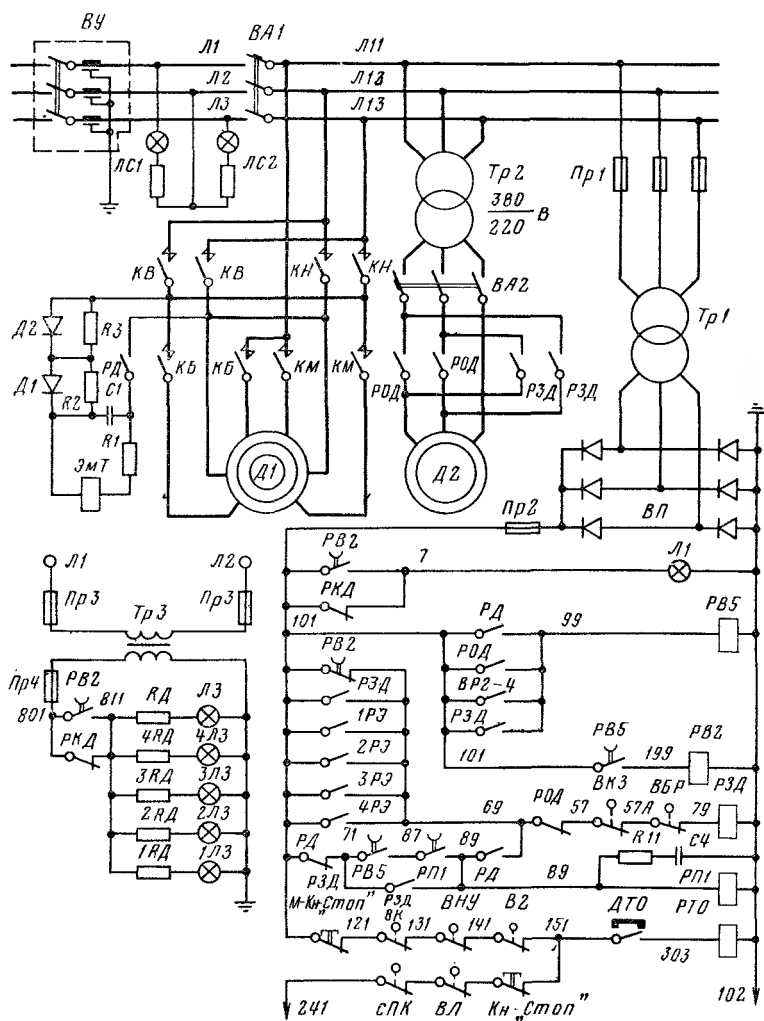
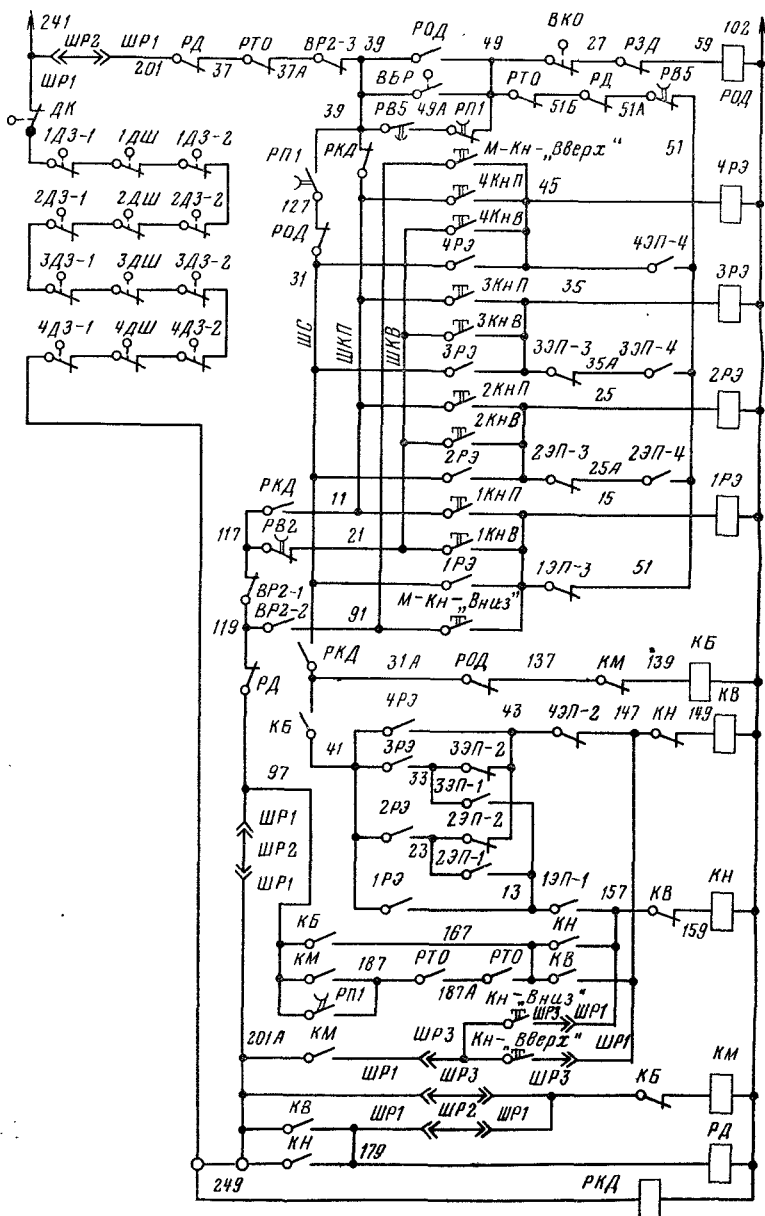


Рис. 5-14. Схема электропривода лифта с раздельным управлением на этажных переключателях.



Первая цифра в обозначении ЭП относится к номеру этажа, на котором установлен данный этажный переключатель, а последняя — означает номер его контакта.

Контакты ЭП в соответствии с диаграммой, помещенной на рис. 5-15, могут находиться в разомкнутом или замкнутом состоянии в зависимости от положения кабины относительно

Контакт ЭП	Положение кабины относительно ЭП		
	Ниже	На этаже	Выше
ЭП-1			X
ЭП-2	X		
ЭП-3	X	X	
ЭП-4		X	X

X — контакт замкнут

Рис. 5-15. Диаграмма замыкания контактов этажного переключателя.

этом прекращается действие магнитного потока на геркон и он размыкается, разрывая цепь питания катушки реле точной остановки РТО.

Безопасность пассажиров при пользовании лифтом обеспечивается перечисленными ниже устройствами и блокировками.

Кабина лифта подвешена к ветвям несущих канатов с помощью рычажного балансирного устройства, обеспечивающего автоматическое выравнивание их натяжения. В случае обрыва или чрезмерного ослабления хотя бы одного из несущих канатов равновесие в балансирах нарушается и свободное плечо балансира, перемещаясь, воздействует на выключатель СПК, размыкая его контакты.

Ответственными узлами механического оборудования лифтов являются ловители и центробежный ограничитель скорости, представляющие собой взаимосвязанные устройства, предотвращающие падение кабины в шахту в случае обрыва несущих канатов, а также останавливающие кабину при недопустимом повышении ее скорости. Ограничитель скорости устанавливается в машинном помещении и связан с механизмом привода ловителей, расположенных на верхней балке кар-

данного этажа и, таким образом, доставляют информацию, необходимую для выбора направления движения кабины и переключения привода на скорость дотягивания перед заданной остановочной площадкой.

Для точной остановки лифта на уровне пола данного этажа предусмотрен датчик точной остановки ДТО. Последний представляет собой расположенный на кабине герметизированный контакт (геркон), управляемый магнитным потоком постоянного магнита. В зоне точной остановки стальная полоса, установленная в шахте, шунтирует магнитную систему ДТО. При

каса кабины, бесконечным стальным канатом, перекинутым через шкив ограничителя скорости. Постоянное натяжение этого каната создается натяжным устройством в прямке шахты и контролируется выключателем ВНУ. Если скорость движения кабины превысит номинальное значение на 15–40%, канат ограничителя скорости под действием центробежного механизма резко останавливается, в то время как кабина еще продолжает движение. Это приводит к увеличению натяжения каната ограничителя скорости и срабатыванию механизма ловителей, которые и удерживают кабину на направляющих. При этом размыкаются контакты выключателя ловителей ВЛ.

На каждой из ветвей каната ограничителя скорости в определенных местах укреплены зажимы, которые взаимодействуют с конечным выключателем ВК при переходе кабиной крайних верхнего и нижнего рабочих положений.

Двери шахты всех лифтов оборудуются автоматическими замками, запирающими двери прежде, чем кабина отойдет от уровня посадочной площадки, и гарантирующими невозможность их открывания при отсутствии кабины на этаже. Дверные замки снабжены выключателями (1ДЗ-1 – 4ДЗ-1 и 1ДЗ-2 – 4ДЗ-2), контакты которых размыкаются при отпирании замков. Надежность закрывания дверей шахты и кабины контролируется контактами выключателей соответственно 1ДШ – 4ДШ и ДК, которые замыкаются только в том случае, если обе створки дверей плотно прижаты одна к другой в месте их притвора.

Перечисленные электрические контакты включены в общую шину питания цепей управления и образуют так называемый блок безопасности. Размыкание любого из них предотвращает пуск или вызывает остановку кабины, если до этого она находилась в движении. В эту же шину включены две кнопки: аварийная Кн-«Стоп», расположенная в кабине, и М-Кн-«Стоп» в машинном помещении — и выключатель цепей управления В2, установленный в прямке шахты.

При конструкции кабины с неподвижным полом безопасность пассажиров при входе в кабину и выходе из нее возлагается на электропривод дверей, осуществляемый с помощью асинхронного двигателя Д2. Механизм открывания и закрывания дверей кабины посредством прикрепленных к ним захватов одновременно перемещает и створки дверей шахты на этаже стоянки. Управление двигателем Д2 производится силовыми контактами реле открытия РОД и закрытия РЗД дверей. Конечные положения «Двери открыты» и «Двери закрыты» контролируются выключателями ВКО и ВКЗ. Во избежание заще-

мления пассажиров створками раздвижных дверей усилие их перемещения ограничивается значением 120 Н, а кинетическая энергия закрывающейся створки не должна превышать 8 Дж. В дополнение к этому в схеме с помощью микропереключателя ВБР предусмотрена блокировка, обеспечивающая быстрый реверс электропривода при появлении препятствия закрыванию дверей.

Управление двигателем лебедки Д1 производится контакторами КБ и КМ, подключающими к сети обмотки статора соответственно большой или малой скорости, и контакторами КВ и КН, определяющими направление движения кабины соответственно вверх или вниз. Привод снабжен механическим тормозом с электромагнитом постоянного тока ЭмТ. Катушка ЭмТ с помощью контакта реле движения РД подключается к сети переменного тока через резистор R1 и выпрямительное устройство, состоящее из кремниевых диодов Д1 и Д2, резисторов R2 и R3 и конденсатора С1.

Схемой управления электроприводом предусматривается три режима работы лифта: нормальный, реверсии и управления из машинного помещения. В нормальном режиме в колодку штепсельного разъема ШР1, расположенную на крыше кабины, включена вставка нормальной работы ШР2. Переключатель режимов работы ВР2 на станции управления лифтом в машинном помещении находится в положении, при котором замкнуты его контакты ВР2-1 и ВР2-3, а контакты ВР2-2 и ВР2-4 разомкнуты. Управление лифтом осуществляется из кабины кнопками приказа 1КнП — 4КнП или кнопками вызова 1КнВ — 4КнВ с этажных площадок. Рассмотрим последовательность работы схемы.

Предположим, что свободная кабина находится на первом этаже с закрытыми дверьми. Реле РТО отключено контактом датчика ДТО. Если цепь блока безопасности собрана, то реле контроля дверей РКД находится в возбужденном состоянии и его размыкающие контакты в цепи питания сигнальных ламп 1ЛЗ — 4ЛЗ и в цепи лампы освещения кабины Л1 разомкнуты. Пассажир нажимает кнопку вызова 1КнВ. По цепи 249, ШР2 (201А — 97), размыкающий контакт РД (97 — 119), контакт ВР2-1, размыкающий контакт ВР2 (117 — 21), 1КнВ, 1ЭП-3, размыкающие контакты РВ5, РД, РТО в цепи 51 — 49 и ВКО и РЗД в цепи 49 — 59 подается питание на РОД, которое затем поддерживается до полного раскрытия дверей самоблокировкой по цепи ШР2 (241 — 201), размыкающие контакты РД, РТО, ВР2-3, замыкающий контакт РОД (39 — 49), размыкающие контакты ВКО и РЗД. Реле РОД своими силовыми контактами

включает Д2 в направлении открытия дверей, а замыкающим контактом (101—99) включает реле РВ5. Последнее в свою очередь по цепи 101—199 включает реле РВ2 и, размыкая свой контакт (51—51А), предотвращает образование паразитной цепи, по которой могло бы включиться этажное реле 1РЭ (при включенном 1РЭ двери начнут закрываться сразу же после окончания процесса открывания). Размыкающий контакт РВ2 (117—21) снимает питание с шины кнопок вызова ШКВ, запрещая повторный вызов кабины, а замыкающие контакты (801—811) и (101—7) включают соответственно лампы 1ЛЗ—4ЛЗ световой сигнализации на вызывных постах и лампу Л1 освещения кабины. С началом открывания дверей размыкаются контакты ДК, 1ДШ, 1ДЗ-1 и 1ДЗ-2. Реле РКД теряет питание и замыкает размыкающий контакт (39—11), подавая напряжение на шину кнопок приказа ШКП.

При полном раскрытии дверей цепь питания РОД разрывается конечным выключателем ВКО, теряет питание РВ5. Однако контакт последнего будет удерживать включенным реле РВ2 еще 5—7 с и примерно столько же удерживаются контакты РВ2 после отключения его катушки. Благодаря этому двери будут оставаться открытыми 10—14 с. Если в течение этого времени кнопка приказа нажата не будет, то размыкающий контакт РВ2 (101—69) через размыкающий контакт РОД, замкнутые контакты ВБР и ВКЗ подаст питание на реле РЗД, которое, подключив двигатель Д2, осуществит операцию закрытия дверей и своими замыкающими контактами (71—89) и (101—99) включит реле РП1 и РВ5, а следовательно, и реле РВ2. Реле РЗД отключится при размыкании конечного выключателя ВКЗ. При этом повторного срабатывания реле РОД не произойдет, так как в рассматриваемом случае замыкающий контакт (39—49А) РВ5 размыкается раньше, чем замыкается размыкающий контакт РП1 (49А—49). После закрытия дверей с помощью реле РВ5 и РВ2 создается выдержка времени 10—14 с, в течение которой контакт РВ2 (117—21) в шине кнопок вызова остается разомкнутым, что исключает в этот период вызов кабины. С отпаданием реле РВ2 схема возвращается в исходное состояние.

Если пассажир вошел в кабину на первом этаже и нажал кнопку этажа назначения, например третьего ЗКнП, то по цепи ШР2 (241—201), размыкающие контакты РД, РТО, ВР2-3, РКД (39—11), ЗКнП включается ЗРЭ, которое замыкает свои замыкающие контакты: (41—33), подготавливая цепь питания катушек контакторов направления (в данном случае КВ); (31—35), подсоединяя катушку ЗРЭ к шине самоблокировки

ШС, и (101—69), подавая питание на катушку РЗД. Реле РЗД становится на самоблокировку (101—69), своими силовыми контактами подключает двигатель Д2 в направлении закрывания дверей, замыкающим контактом (101—99) поддерживает питание реле РВ5, а замыкающим контактом (71—89) включает реле пуска РП1. Последнее по цепи (39—127) обеспечивает питание шины самоблокировки ШС до начала движения и включения реле РД и размыкает размыкающий контакт (49—49А), предотвращая повторное открывание дверей.

При полном закрытии дверей РЗД отключается конечным выключателем ВКЗ, замыкаются все контакты блока безопасности и включается реле РКД. Его замыкающий контакт (117—11) обеспечивает питание ШКП при закрытых створках дверей и неподвижной кабине (на случай, если пассажир, войдя в кабину лифта, не успел нажать кнопку приказа при открытых дверях), а замыкающий контакт (31—31А) через размыкающие контакты РОД и КМ подает питание на катушку контактора КБ. В свою очередь замыкающий контакт КБ (31А—41) по цепи: замыкающий контакт ЗРЭ (41—33), ЗЭП-2, 4ЭП-2, размыкающий контакт КН включает катушку контактора КВ. силовые контакты которого подключают главный двигатель Д1 в сторону движения на подъем, а вспомогательные контакты (201А—179) и (167—147) включают соответственно реле движения РД и цепь самоблокировки: ШР2 (201А—97), замыкающий контакт КБ (97—167), замыкающий контакт КВ, размыкающий контакт КН (147—149). Реле РД подключает ЭмТ (при этом кабина приходит в движение) и производит следующие переключения в схеме: замыкающим контактом (101—99) восстанавливает питание РВ5, размыкающим контактом (101—71) разрывает прямую цепь питания реле РП1, а замыкающим контактом (69—89) обеспечивает его питание через контакты (101—69) этажного реле (в данном случае ЗРЭ) до момента перехода на пониженную скорость, размыкающим контактом (97—119) прекращает питание ШКП и ШКВ, размыкает размыкающий контакт (51А—51Б), дополнительно исключая возможность включения РОД нажатием кнопок вызова при прохождении кабиной зон точных остановок. При этом питание катушек контакторов КБ и КВ и шины самоблокировки ШС этажных реле осуществляется через контакты блока безопасности по цепи: ШР2 (201А—97), замыкающие контакты КБ (97—167) и КВ (167—147), 4ЭП-2, ЗЭП-2, замыкающие контакты ЗРЭ (33—41), КБ.

При подходе к этажу следования (в данном случае снизу) размыкаются контакты ЗЭП-2 и разрывают цепь питания реле

3РЭ и контактора КБ. Теряет питание РП1, хотя в течение некоторого времени (0,2—0,7 с), достаточного для срабатывания КМ, оно будет находиться в возбужденном состоянии за счет разряда емкости С4. Размыкающий контакт КБ включает контактор скорости дотягивания КМ. Контакт КВ остается включенным, так как будет получать питание через замкнутые контакты РТО (187—167), РП1 и впоследствии КМ (97—187).

При наезде на магнитный шунт датчика точной остановки ДТО реле РТО отпадает и разрывает своими замыкающими контактами (187—167) цепь питания контактора направления КВ, а вместе с ним отключаются контактор КМ и реле РД. Кабина останавливается. Накладывается механический тормоз. При этом размыкающие контакты РД (201—37) и РТО (37—37А) через контакт ВР2-3, замкнутый контакт РВ5 (39—49А), уже замкнувшийся размыкающий контакт РП1 (49А—49) и размыкающие контакты ВКО и РЗД подключают катушку реле РОД. Дальнейшее поведение схемы аналогично рассмотренному выше: двери автоматически открываются, с помощью реле РВ5 и РВ2 создается выдержка времени 10—14 с, необходимая для выхода пассажиров из кабины, затем двери автоматически закрываются, а еще через 10—14 с гаснут сигнальные лампы 1ЛЗ—4ЛЗ на вызывных постах. Схема подготовлена к принятию очередного вызова.

При вызове кабины с посадочной площадки одного из промежуточных этажей (например, с третьего) нажимается соответствующая кнопка вызова 3КнВ. Если кабина не стоит на этаже вызова, то один из контактов этажного переключателя 3ЭП-3 или 3ЭП-4 разомкнут, поэтому импульс на открывание дверей не проходит. Включается этажное реле 3РЭ и в зависимости от состояния контактов этажного переключателя 3ЭП-1 и 3ЭП-2 (т. е. в зависимости от положения кабины относительно этажа вызова) включает контакторы КБ и КВ или КБ и КН, в результате чего кабина начинает двигаться к этажу вызова. При подходе к этажу вызова аналогично вышеописанному размыканием контактов переключателя 3ЭП-1 или 3ЭП-2 отключается контактор КБ и включается КМ, а затем в зоне точной остановки отключается реле РТО. Кабина останавливается, двери открываются. После входа пассажиров и нажатия кнопки этажа назначения включаются: соответствующее этажное реле и реле РЗД, а после закрытия дверей — реле РКД, контакторы КБ и КВ или КН, реле РД и кабина движется к этажу назначения.

В режиме ревизии, используемом для осмотра, регулировки и обслуживания оборудования и аппаратов, расположенных

в шахте и на крыше кабины лифта, в колодку штепсельного разъема ШР1 включается вставка ШРЗ, при которой управление из кабины и этажных площадок отключено, а управление лифтом производится с крыши кабины кнопками Кн-«Вверх» и Кн-«Вниз». При нажатии одной из них и замкнутых контактах блока безопасности кабина перемещается только на малой скорости вверх или вниз и останавливается в любом месте шахты после прекращения нажатия на кнопку.

При управлении из машинного помещения переключатель ВР2, установленный на дверце шкафа панели управления, переключают в положение «Управление из машинного помещения». При этом отключаются шины кнопок приказа ШКП и вызова ШКВ, цепь питания РОД (ВР2-1 и ВР2-3 разомкнуты), включаются РВ5 и РВ2 (ВР2-4 замкнут) и подключаются кнопки М-Кн-«Вверх» и М-Кн-«Вниз», расположенные на панели управления (замкнут ВР2-2). Размыканием размыкающего контакта РВ5 (51—51А) исключается срабатывание РОД при нажатии кнопки вызова. В этом режиме движение кабины происходит на большой скорости при нажатии на ту или другую кнопку М-Кн. На крайних этажах кабина останавливается автоматически, как и в нормальном режиме работы, а кнопкой М-Кн-«Стоп» может быть остановлена в любом месте шахты.

Помимо рассмотренных в состав схемы входят также не показанные на рис. 5-14 узлы телефонной связи кабины и площадки первого этажа с диспетчерским пунктом и цепи звуковой сигнализации для вызова дежурного диспетчера.

5-4. ЭЛЕКТРОПРИВОД СКОРОСТНОГО ЛИФТА

Рассмотрим разработанную институтом ВНИИ Электропривод типовую схему электропривода скоростного лифта грузоподъемностью 1000 кг и скоростью движения 2 м/с, предназначенного для зданий высотой 20—40 этажей. Для лифта предусмотрена схема собирательного управления на отечественных логических элементах типа «Логика», отдельные узлы которой были рассмотрены в § 5-2. Электропривод выполнен безредукторным по системе ТП—Д с использованием специального тихоходного двигателя постоянного тока с независимым возбуждением типа МПЛ40-136 ($U_{ном} = 440/220$ В; $P_{ном} = 40/20$ кВт; $I_{ном} = 125$ А; $n_{ном} = 120/60$ об/мин). Система управления электроприводом реализована на элементах УБСР.

Схема силовых цепей электропривода представлена на рис. 5-16. Двигатель Д получает питание от реверсивного ТП, собранного по мостовой встречно-параллельной схеме. Выпрями-

тельная группа для каждого направления тока $BГ1$ и $BГ2$ включает в свой состав по два параллельно соединенных моста $M1, M2$ и $M3, M4$ с индуктивными делителями тока соответственно $ИДТ1$ и $ИДТ2$. Управление преобразователем — совместное с контролем и регулированием среднего значения уравнильного тока. При этом автоматически обеспечиваются идеальное согласование регулировочных и внешних характеристик вентиляльных групп и отсутствие режима прерывистых токов и благодаря этому достигается непрерывность управления выпрямленным током. Для ограничения пульсирующей составляющей уравнильного тока предусмотрены уравнильные

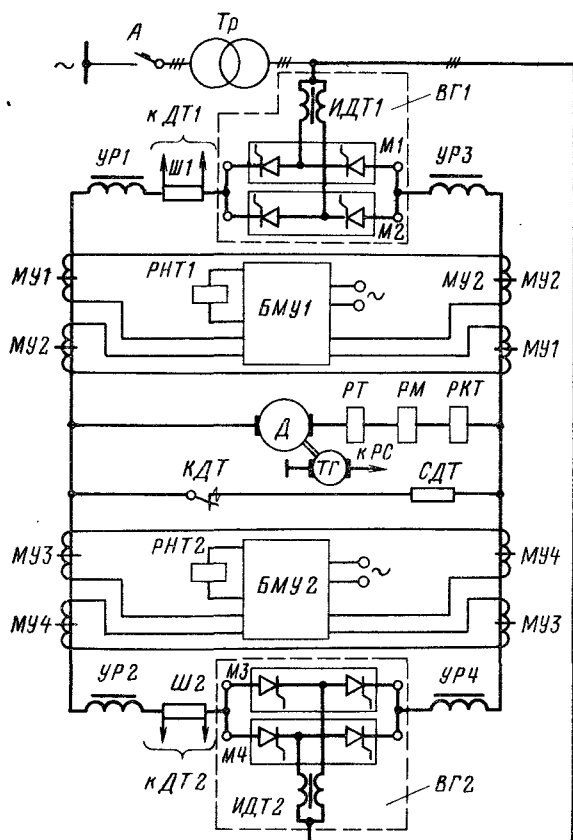


Рис. 5-16. Силовая схема электропривода скоростного лифта.

реакторы УР1 — УР4. В якорной цепи двигателя предусмотрены реле РТ и РМ, осуществляющие защиту от аварийных токов перегрузки и коротких замыканий, и реле контроля минимального тока якоря РКТ. Блоки магнитных усилителей БМУ1 и БМУ2, на выходы которых подключены обмотки реле наличия тока РНТ1 и РНТ2, используются в качестве датчиков контроля тока вентильных групп. Контакты перечисленных реле включены в цепь защитных блокировок электрооборудования.

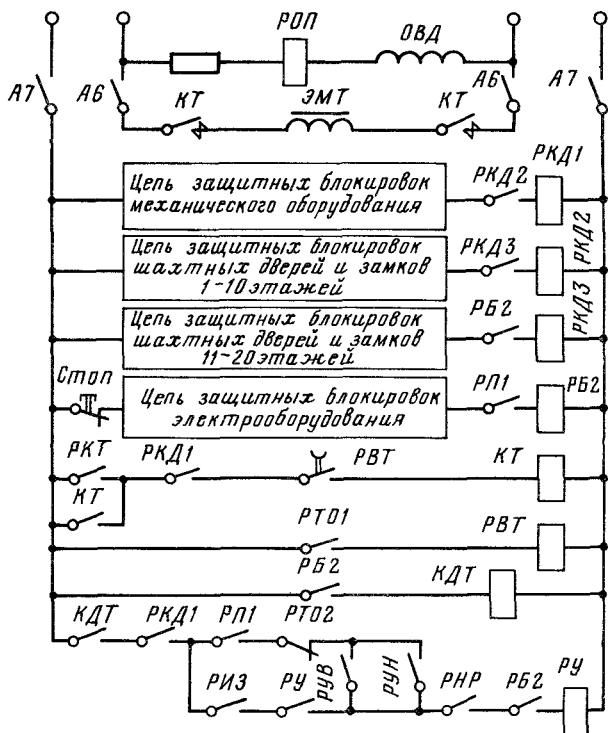


Рис. 5-17. Схема защитных блокировок и отключения привода.

Узел защитных блокировок релейно-контакторной схемы управления лифтом представлен на рис. 5-17. Там же показана цепь питания обмотки возбуждения ОВД двигателя с реле обрыва поля РОП и электромагнита тормоза ЭМТ, управляемого контактами контактора КТ. Реле РКД1 — РКД3 контролируют замкнутое состояние контактов рассмотренных в § 5-3 блокировочных устройств: канатов, ловителей, приямка, ма-

шинного помещения, а также дверей шахты и кабины и их замков. Блокировочное реле *РБ2* включается в начале каждого рейса с помощью контакта реле пуска *РП1*, если замкнуты контакты цепи защитных блокировок электрооборудования. Эта цепь размыкается при отключении реле *РНТ1* или *РНТ2*, если ток в какой-либо вентильной группе окажется ниже заданного уравнительного тока, при отключении реле *РОП*, а также в аварийных ситуациях при срабатывании реле *РТ* или *РМ* и нажатии кнопки *Стоп*. При этом замыкающие контакты *РБ2* разрывают цепь питания обмотки контактора *КДТ* и реле *РКД3*, теряют питание реле *РКД2* и *РКД1*, а следовательно, и контактор *КТ*. Размыкающий силовой контакт *КДТ* подключает к якору двигателя сопротивление динамического торможения *СДТ* (рис. 5-16), а в результате отпадания контактора *КТ* накладывается механический тормоз. Одновременно снимаются импульсы управления вентилями ТП.

Для устранения просадки кабины при пуске электропривода контактор *КТ*, управляющий электромагнитом тормоза *ЭМТ*, включается (при замкнутых контактах блокировок) только после срабатывания реле *РКТ*, когда ток якоря двигателя достигнет значения не менее $0,1 I_{ном}$. Отключение контактора *КТ* (наложение механического тормоза) после прибытия кабины на этаж назначения и отключения реле точной остановки *РТО1* происходит с задержкой, определяемой выдержкой времени реле *РВТ*, в течение которой заканчивается процесс автоматического выравнивания уровней пола кабины и этажной площадки.

Реле управления *РУ* включается при пуске замыкающим контактом реле *РП1* и обеспечивает режим рабочей скорости электропривода. При подходе кабины к этажу назначения отпадают реле импульса замедления *РИЗ*, а затем *РУ*, и привод переходит на скорость дотягивания до уровня точной остановки.

Помимо обозначенных на рис. 5-17 полная релейно-контакторная схема содержит: реле направления *РУВ* и *РУН* (см. рис. 5-11); реле нормальной работы *РНР*, при включении которого задается рабочая скорость электропривода; реле *Р1*, подключающее при отпадании *РТО1* контур регулирования положения кабины в зоне точной остановки; реле, контролирующее исправность предохранителей в цепях тиристорных преобразователей и другие аппараты и реле, с помощью которых обеспечивается управление движением кабины лифта и автоматически двери.

Система управления электроприводом (рис. 5-18) имеет

Контур регулирования тока содержит два автономных канала регулирования и измерения тока с ИП-регуляторами P_{TV} и P_{TH} , каждый из которых управляет одной вентильной группой. На входы регуляторов тока подаются сигналы отрицательной обратной связи по току $i_{0,т,в}$ и $i_{0,т,н}$ с датчиков тока $DT1$ и $DT2$ и по три заданных сигнала: уравнительного тока $i_{3,т,у,в}$ и $i_{3,т,у,н}$ с потенциометров $R1$ и $R2$, получающих питание от блока ограничения $BO2$ регулятора скорости; начального тока двигателя $i_{3,т,0,в}$ и $i_{3,т,0,н}$ с потенциометров $R3$ и $R4$ на период, предшествующий снятию механического тормоза при пуске, и тока двигателя $i_{3,т}$ с выхода регулятора скорости PC , причем напряжение $i_{3,т}$ благодаря разделительным диодам $D1$ и $D2$ поступает к регулятору тока лишь той вентильной группы, которая работает при заданном направлении тока двигателя. Полярность сигналов задания уравнительного и начального токов соответствует выпрямительному режиму работы

вентильных групп. Ограничение выходного напряжения регуляторов тока осуществляется блоками *Б03* и *Б04*.

Контур регулирования скорости настроен на симметричный оптимум (см. § 4-5), при котором регулятор скорости *РС* обладает передаточной функцией ИП-звена, а установившаяся динамическая ошибка при линейном изменении задания скорости и ошибка по нагрузке равны нулю.

Оптимальная тахограмма процессов пуска и торможения (см. рис. 4-8) с ограничением ускорения и рывка формируется комбинированным задатчиком интенсивности, который состоит из последовательно соединенных задатчиков рывка *ЗР*, ускорения *ЗУ* и скорости *ЗС*. Задатчик рывка представляет собой операционный усилитель с релейной характеристикой (рис. 5-19). Ограничение выходного напряжения $u_{з,р}$ задатчика рывка обеспечивается блоком *Б01*. В качестве задатчика ускорения использован задатчик интенсивности типа *ЗИ-1*. Темп изменения его выходного напряжения $u_{з,у}$ определяется лишь настройкой задатчика и не зависит от напряжения $u_{з,р}$. Направление изменения $u_{з,у}$ определяется полярностью $u_{з,р}$. Задатчик скорости собран по схеме интегратора, поэтому темп и направление изменения его выходного напряжения $u_{з,с}$ зависят от значения и полярности $u_{з,у}$.

Диаграммы изменения во времени выходных напряжений задатчиков приведены на рис. 5-20. При подаче на вход устройства напряжения $u_{вх}$ на выходе *ЗР* появляется неизменное во времени напряжение $u_{з,р}$ (рис. 5-19 и 5-20, а). Так как $u_{з,р} > 0$, то на выходе *ЗУ* напряжение нарастает в положительном направлении вплоть до насыщения (момент времени t_1 на рис. 5-20, б). Далее до момента времени t_2 $u_{з,у} = \text{const}$. Выходное напряжение *ЗС* изменяется соответственно по параболическому закону до момента времени t_1 и линейно в интервале $t_1 - t_2$ (рис. 5-20, в). На вход *ЗР* через резисторы *R6* и *R7* (см. рис. 5-18) подается сигнал суммарной обратной связи $u_{о,н}$ по напряжениям $u_{з,у}$ и $u_{з,с}$. В момент времени t_2 $u_{о,н} = u_{вх}$ и $u_{з,р}$ обращается в нуль (рис. 5-19 и 5-20 а — в). Дальнейший рост $u_{о,н}$ (момент времени t_2') приводит к изменению полярности $u_{з,р}$ (рис. 5-19). Задатчик ускорения при этом выходит из насыщения и его напряжение снижается. Уменьшается также $u_{о,н}$. В момент времени t_3 снова $u_{о,н} = u_{вх}$, $u_{з,р} = 0$, $u_{з,у} = 0$, а напряжение $u_{з,с}$ достигает максимального значения. Сформированный таким образом сигнал поступает на вход *РС*.

В цепи задающего напряжения, поступающего от источника питания *ИП* (см. рис. 5-18), включены контакты реле рассмо-

тренных выше защитных блокировок: РКД1, КДТ, РБ2, КТ. Реле РУВ и РУН своими контактами определяют полярность задающего напряжения, а следовательно, и направление движения. Включенное состояние реле нормальной работы РНР соответствует выбору режима движения лифта с рабочей скоростью. При пуске включаются реле Р1, которое подключает

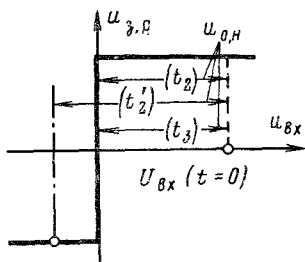
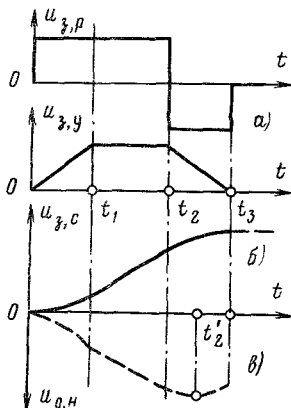


Рис. 5-19. Характеристика управления задатчиком рывка.

Рис. 5-20. Диаграммы работы задатчика движения лифта.



вход ЗР к источнику задающего напряжения, и реле РУ, которое своим замыкающим контактом шунтирует добавочный резистор Р5 и обеспечивает таким образом задание рабочей скорости. При подходе кабины к этажу назначения РУ отпадает и вводит в цепь задающего напряжения резистор Р5. Уменьшается сигнал задания скорости, привод переходит на пониженную скорость, с которой кабина входит в зону точной остановки. Здесь контакт РТО1 отключает реле Р1, и на вход задатчика подключается регулятор положения РП, управляемый блоком точной остановки БТО.

Наиболее сложные требования к электроприводу предъявляются при автоматизации рабочего цикла высокоскоростных лифтов, обслуживающих специальные высотные сооружения. Характерным примером этого может служить электропривод скоростных лифтов башни Московского телецентра, разработанный фирмой АЭГ [24]. Структурная схема электропривода представлена на рис. 5-21.

Безредукторная подъемная лебедка приводится в движение двигателем Д, получающим питание от индивидуального генератора Г. Для управления полем генератора применен реверсивный тиристорный возбудитель ТВ. Схема управления является двухконтурной; внутренний контур содержит регуля-

The diagram illustrates a control system for a power plant, divided into electrical and control sections.

Electrical Section (Top):

- Power Source:** A three-phase supply with a transformer (ТВ) and a voltage transformer (ОВГ).
- Control and Protection:** Includes a manual control and reset switch (Ручное управление и ретвизия), a relay (ЗИ), and a relay (РГ).
- Motor and Generator:** A motor (М) and a generator (Г) are connected to a transformer (ТВ) and a voltage transformer (ОВГ).
- Current Transformer (CT):** A CT (ТГ) is connected to the motor and generator.
- Relays:** Relays (А) and (Д) are connected to the CT and the motor/generator.
- Control Signals:** Signals $v_{расч}$, i , and v are shown.

Control Section (Bottom):

- Control Unit (СУ):** The central control unit, receiving signals from the electrical section and the operator.
- Operator Interface:** Includes a control panel (КП) and a display (ДКП).
- Relays and Switches:** Relays (А, Д, К) and switches (КП, ДКП) are connected to the control unit.
- Control Signals:** Signals $v_{расч}$, $v_{оп}$, $v_{оп} = f(t)$, and $пуск$ are shown.
- Control Logic:** Includes a relay (ЗИ), a relay (РГ), and a relay (РЧ).
- Control Unit (СУ):** The central control unit, receiving signals from the operator and the electrical section.
- Control Panel (КП):** The operator's interface, including a display (ДКП) and a control panel (КП).
- Display (ДКП):** A display showing the system's status.
- Control Unit (СУ):** The central control unit, receiving signals from the operator and the electrical section.
- Control Panel (КП):** The operator's interface, including a display (ДКП) and a control panel (КП).
- Display (ДКП):** A display showing the system's status.

по пройденному пути. При ручном управлении и ревизии заданное значение скорости формируется задатчиком интенсивности *ЗИ*.

На рис. 5-22 показано формирование заданной кривой скорости $v_{расч} = f(t)$ вычислительной машиной. При наладке устанавливаются кодированные максимально допустимые значения $\rho'_{max} = (da/dt)_{max}$, a_{max} и v_{max} . Поэтому при получении команды

«Пуск» на базе этих величин машина вычисляет заданные значения скорости, осуществляя операции интегрирования в соответствии с графиками на рис. 5-22.

Таким образом, машина в каждый момент времени задает нужное значение скорости. Интегрированием получаются расчетные значения пройденного пути $S_{расч}$, которые сравниваются с истинными значениями пройденного пути S , полученными

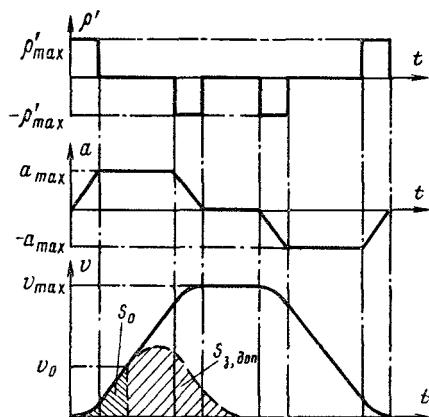


Рис. 5-22. Формирование тахограммы лифта башни МТЦ.

в виде кода с помощью счетчика СИ и датчика импульсов ДИ связанного с осью центробежного ограничителя скорости ЦОС.

Лифт имеет большую рабочую скорость движения 7 м/с. При ограниченном ускорении и рывке путь, проходимый кабиной после получения команды на замедление, измеряется десятками метров. При собирательном управлении схемой может быть зафиксирован приказ или вызов на этаж, находящийся в данный момент ближе, чем путь замедления. В этом случае приказ или вызов не должен быть выполнен. В данной схеме вычислительная машина в каждый момент времени, считая текущее заданное значение скорости начальным v_0 , определяет путь замедления $S_{з, доп} = f(v_0, a_0)$, который должна пройти кабина до остановки при заданном рывке a'_0 и начальном ускорении a_0 . Этот путь на рис. 5-22 изображен площадью с редкой штриховкой. В сумме с пройденным к этому моменту времени путем S_0 (частая штриховка) он составляет путь допустимой остановки $S_{доп}$, отсчитываемый от исходной точки. Этот путь в сравнивающем устройстве ЭС сопоставляется с отсчитываемым от той же точки расстоянием H_i до ближайшего пункта.

на котором заказана остановка по приказу или вызову. Если $S_{\text{доп}} < H_i$, то продолжается движение до тех пор, пока не выполнится условие $S_{\text{доп}} = H_i$, что и послужит основанием для переключения привода на замедление с последующей остановкой на заданном этаже. Если $S_{\text{доп}} > H_i$, то поступающий приказ или вызов не отрабатывается.

Связь с кабиной является бесконтактной. Сигналы приказов КП или датчиков контроля безопасности ДКБ, установленных в кабине, передаются через антенну А и приемно-передающее устройство в схему управления.

При нахождении кабины на этаже схемой с помощью датчиков ДКП осуществляется автоматическое выравнивание. Тормоз накладывается лишь при длительных остановках.

При установленных при наладке значениях ρ'_{max} и a_{max} время пуска до скорости 7 м/с составляет около 15 с. При этом компенсация большой постоянной времени генератора не представляет трудностей. Схема хорошо иллюстрирует достаточно универсальный подход к формированию оптимальных процессов методом программного управления с последовательной коррекцией: за счет последовательной коррекции динамические составляющие в оптимальной зависимости $u_{3,c} = f(t)$ сводятся к пренебрежимому минимуму, а далее формируется требуемый закон движения на входе системы, которому она следует с высокой точностью.

Во всех рабочих режимах эта система работает как система поддержания постоянства скорости. Токоограничение предусмотрено на случай аварийных перегрузок или нарушений в работе системы управления. Именно в этих условиях преимущества программного управления в сочетании с последовательной коррекцией проявляются наиболее полно.

5.5. ЭЛЕКТРОПРИВОД ШАХТНОГО СКИПОВОГО ПОДЪЕМНИКА

Шахтная скиповая подъемная установка является характерным примером механизма с автоматической отработкой цикла, требуемую производительность которого удастся обеспечить в основном за счет поддержания постоянства замедления электропривода при переходе с рабочей скорости на скорость дотягивания к уровню точной остановки. В большинстве случаев замедление электропривода при подходе скипа к разгрузочным кривым осуществляется по программе, которая формируется специальным устройством в функции пути (положения

Один из вариантов реализации программного управления замедлением представлен на рис. 5-23 функциональной схемой

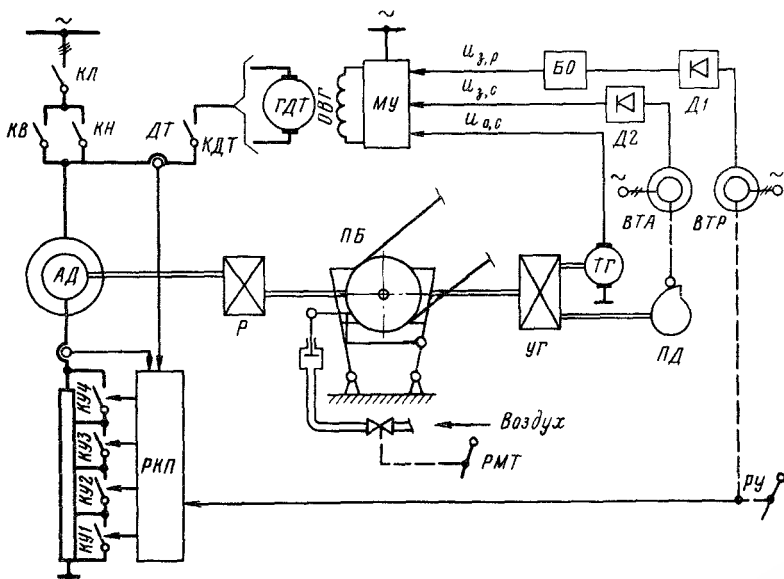


Рис. 5-23. Схема асинхронного электропривода скипового подъемника.
РКП – роторная контакторная панель; *Р* – редуктор; *УГ* – указатель глубины;
РМТ – рычаг механического тормоза; *РУ* – рычаг управления.

асинхронного электропривода с фазным ротором, в котором используется динамическое торможение двигателя. Элементом, формирующим программу замедления, является поворотный диск ПД, механически соединенный с указателем глубины. За весь период подъема скипа диск поворачивается на угол примерно 300° . В границах угла, соответствующего пути замедления, диск имеет специальный профиль, с помощью которого осуществляется поворот вращающегося трансформатора ВТА, вырабатывающего сигнал заданного значения скорости u_{3c} . При этом конфигурация профиля диска обеспечивает параболический закон изменения u_{3c} в функции угла поворота (пути, пройденного скипом), чем достигается постоянство

заданной величины ускорения при замедлении. На входе магнитного усилителя МУ, выполняющего функции возбудителя генератора динамического торможения ГДТ, сигнал $u_{3,c}$ сравнивается с сигналом $u_{0,c}$, пропорциональным действительной скорости и поступающим с тахогенератора ТГ. Результат сравнения (ошибка регулирования скорости) $u_{0,c} - u_{3,c} = \Delta u_c > 0$ определяет ток возбуждения I_b асинхронного двигателя: $I_b = k \Delta u_c$, где k — коэффициент передачи системы, учитывающий коэффициенты усиления МУ и ГДТ и сопротивление нагрузки ГДТ.

При постоянном сопротивлении роторной цепи поддержание момента динамического торможения на требуемом уровне при снижении скорости обеспечивается путем непрерывного увеличения тока возбуждения I_b (см. рис. 5-2), а следовательно, за счет увеличения ошибки Δu_c . Когда ток I_b достигает предельно допустимого значения, по сигналу датчика тока динамического торможения ДТ срабатывает контактор роторной цепи и ее сопротивление уменьшается на одну ступень. Ток возбуждения при этом также уменьшается и далее по мере снижения скорости двигателя вновь постепенно возрастает до допустимого значения, при котором срабатывает очередной контактор роторной цепи. Таким образом, в процессе замедления система управления с некоторой ошибкой, зависящей от $M_{ст}$ и коэффициентов усиления системы и обратной связи по скорости, поддерживает момент двигателя на уровне, обеспечивающем требуемый темп торможения.

В схеме предусмотрено также ручное управление режимом замедления. Используемый для этой цели рычаг управления связан с вращающимся трансформатором ВТР. Его выходное напряжение в зависимости от положения рычага определяет задание скорости $u_{3,p}$ и сравнивается на входе МУ с сигналом тахогенератора. Для ограничения напряжения $u_{3,p}$ и темпа его изменения служит блок ограничения БО. Воздействуя на рычаг управления, а также при необходимости на рычаг механического тормоза, машинист может получить требуемый режим замедления.

Для контроля пути в процессе замедления вместо вращающихся трансформаторов могут применяться путевые сопротивления с большим числом ступеней, выполненные в виде поворотных контроллерных аппаратов КАВ и КАН (рис. 5-24, а). Ползушки аппаратов, перемещаясь, в процессе замедления изменяют сопротивление в цепи тахогенератора ТГ так, что тормозной момент двигателя остается примерно постоянным, если скорость изменяется с предусмотренным постоянным темпом.

The figure consists of two schematic diagrams, labeled 'a)' and 'b)', illustrating the electrical control of a three-phase asynchronous motor.

Diagram (a): This diagram shows the main power circuit and the control circuit. The main circuit includes a three-phase supply (B, ~), a main switch (КВ), a thermal relay (РТТ), and a contactor (КДТ) connected to the motor (МУ). The control circuit is connected to one phase of the supply and includes a stop button (КН), a forward start button (КП1), a reverse start button (КП2), a stop button (КДТ), a thermal relay (РТТ), and a stop button (КН). The motor is connected to the main circuit through the contactor (КДТ).

Diagram (b): This diagram shows a more detailed control circuit with interlocking. It includes a three-phase supply (B, ~), a main switch (КВ), a thermal relay (РТТ), and a contactor (КДТ). The control circuit is connected to one phase of the supply and includes a stop button (КН), a forward start button (КП1), a reverse start button (КП2), a stop button (КДТ), a thermal relay (РТТ), and a stop button (КН). The motor is connected to the main circuit through the contactor (КДТ). The control circuit also includes a stop button (КН), a forward start button (КП1), a reverse start button (КП2), a stop button (КДТ), a thermal relay (РТТ), and a stop button (КН). The motor is connected to the main circuit through the contactor (КДТ).

дополнительное сопротивление $R1$ в цепи $PНВ$ и $PНН$. Основное назначение реле скорости $РС1$ – управление контактором динамического торможения $КДТ$. Если скорость в процессе движения установки недопустимо превысит заданное по диаграмме значение, то сработает реле ограничения скорости $РОС$, отключит питающие двигатель цепи и включит аварийный механический тормоз.

258

(рис. 5-24, б). Этим исключаются недопустимые пусковые токи, возможные при пуске перегруженного статическим моментом привода только по принципу времени и возможность «застревания» двигателя на реостатной характеристике при пуске перегруженного привода только по принципу тока.

В автоматическом режиме работы командоконтроллер КК переводится в крайнее положение, в котором его контакты $K1 - K6$ и KB (или $K11$) замкнуты. Во время загрузки или разгрузки скипа реле ускорения $PY1 - PY6$ включены, а все контакторы, показанные в схеме на рис. 5-24, б, отключены. По окончании загрузки (разгрузки) скипа срабатывают промежуточные контакторы $KП2$ и $KП1$ (их катушки на схеме не показаны). Замыкающие контакты $KП1$ и $KП2$ включают контакторы $KЛ$, $KВ$ (или $КН$), двигатель подключается к сети и работает с максимальным сопротивлением в роторной цепи. При срабатывании $KВ$ (или $КН$) теряет питание реле $PY1$, размыкающий контакт которого с выдержкой времени включает контактор $KУ1$, шунтирующий своими главными контактами первую ступень добавочного сопротивления. Ток ротора возрастает и срабатывает реле тока $РТУ$. Замкнувшийся контакт $РТУ$ поддерживает питание реле $PY2$. При снижении тока ротора до значения, при котором $РТУ$ отключается, $PY2$ теряет питание и с выдержкой времени включает контактор $KУ2$, силовой контакт которого выводит вторую ступень роторного сопротивления. Вновь возрастает ток ротора и срабатывает реле $РТУ$. Далее схема работает аналогично описанному, осуществляя последовательное включение контакторов ускорения $KУ3 - KУ6$. Размыкающие контакты $KУ1 - KУ6$ в цепях катушек $PY1 - PY6$ не допускают повторного включения уже отработавших реле ускорения при очередных срабатываниях $РТУ$, а цепь, состоящая из параллельно включенных замыкающего и размыкающего контактов $KУ1 - KУ5$ обеспечивает совместность с реле $РТУ$ очередности отключения реле и включения контакторов ускорения.

Сигнал на торможение двигателя подается конечным выключателем, расположенным либо непосредственно в стволе шахты, либо на указателе глубины. Выключатель разрывает цепь катушки $KП1$, что приводит к отключению контакторов $KВ$ (или $КН$), $KЛ$, $KУ1 - KУ6$ и включению реле ускорения и контактора $КДТ$, цепь которого была подготовлена контактом реле скорости $РС1$. Контакт $КДТ$ подключает статор АД к ГДТ, и двигатель переходит в режим динамического торможения с полностью введенным сопротивлением в цепи ротора. Узел переключения ступеней сопротивления в процессе тор-

можения работает аналогично, как и при пуске, но уже в функции тока статора с помощью реле *РТТ*.

Когда скорость движения снизится до значения, соответствующего уставке отпускания *РС1* контактор *КДТ* отключается и двигатель переключается с режима динамического торможения на режим дотягивания. В цепь ротора вводится полное сопротивление, включаются контакторы *КВ* (или *КН*) и *КЛ*. Двигатель работает с пониженной скоростью на реостатной характеристике. Для обеспечения необходимой пониженной скорости при реостатных механических характеристиках с малой жесткостью может использоваться маневрирование с автоматическим переключением ступеней, как это было описано в § 5-1 (см. рис. 5-3). При ручном управлении эту операцию выполняет машинист с помощью рычагов контроллера управления и механического тормоза. При входе скипа в зону точной остановки конечный выключатель разрывает цепь питания контактора *КП2*, отпадают контакторы *КЛ*, *КВ* (или *КН*), накладывается механический тормоз.

5-6. ЭЛЕКТРОПРИВОД КАНАТНОЙ ДОРОГИ МАЯТНИКОВОГО ТИПА

Маятниковая канатная дорога (рис. 5-25) оборудуется двумя кабинами 5, совершающими встречные возвратно-поступательные перемещения с остановками в крайних положениях на трассе для загрузки и выгрузки. Кабины перемещаются на роликах-подвесниках 2 по несущим стальным канатам 3, которые крепятся в отдельных точках к удерживающим опорам, расположенным вдоль трассы дороги. Тяговое усилие создается приводной станцией 4 и передается кабинам бесконечным тянущим канатом 6. Натяжение несущих и тяговых канатов осуществляется натяжной станцией 1 с помощью специальных грузов 7.

По характеру рабочих движений маятниковая канатная дорога вполне аналогична двухконцевой шахтной подъемной установке, но с существенно большей продолжительностью цикла, которая при протяженной многокилометровой трассе может значительно превышать 10 мин. При этом длительность переходных процессов пуска и торможения в общем времени цикла составляет незначительную долю. По назначению, конструкции и по характеру статических нагрузок электропривода маятниковая канатная дорога имеет много общего с кольцевой канатной дорогой непрерывного действия.

Необходимость весьма плавного пуска и торможения электропривода, обусловленная значительной податливостью тянущих канатов и условиями транспортировки пассажиров в подвесных кабинах, а также требование точной остановки определили преимущественное применение для пассажирских канатных дорог маятникового типа системы Г — Д.

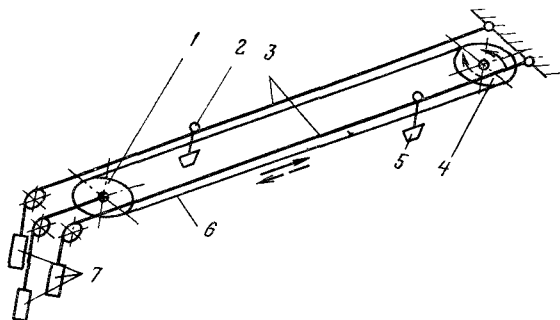


Рис. 5-25. Кинематическая схема канатной дороги маятникового типа.

На рис. 5-26 приведена схема электропривода двухкабинной пассажирской канатной дороги, имеющей следующие технические данные:

Протяженность, м	4860
Высота подъема, м	1400
Грузоподъемность кабины, чел.	26
Максимальная скорость движения, м/с	8
Мощность приводного двигателя, кВт	110

Генератор Г, питающий якорную цепь двигателя Д, возбуждается от трехобмоточного управляемого возбuditеля В. В схеме предусмотрены три отрицательные обратные связи: по скорости, которая электрически суммируется с задающим сигналом и обеспечивает стабилизацию скорости в условиях изменяющейся вдоль трассы движения статической нагрузки, зависящей от угла наклона опорных канатов; по напряжению возбуждения генератора, которая содержит составляющую гибкой отрицательной обратной связи по ЭДС генератора, благодаря чему оказывает демпфирующее влияние при упругих колебаниях тянущего канала; и, наконец, по току якоря с отсечкой.

Требуемый темп изменения скорости при разгоне и замедлении кабины достигается соответствующим изменением задающего напряжения, получаемого с контроллера

к станции один из дисков ретордирующего устройства своим профилированным выступом заставляет поворачиваться по требуемому закону ось KP , а вместе с ней и ползунок регулятора, ставя его в конце замедления в нулевое положение. После отработки пути торможения один из конечных выключателей KBB или KBH , контролирующих положение кабины, отключает цепь контактора направления движения KB или KH . При этом накладываются механические тормоза и кабина полностью останавливается. Обмотка возбуждения генератора отключается от возбuditеля и подключается к якору генератора для гашения остаточного поля.

262

Исправное состояние механического и электрического оборудования контролируется в схеме следующими блокировками и защитами: от превышения скорости — центробежное реле *РЦ*; от обрыва канатов — контакты *К1* и *К2*; от переезда допустимого пути на станциях — аварийные конечные выключатели *КВА1* и *КВА2*; от перегрузки двигателя — реле *РП*, действующее на отключение через выдержку времени 20—30 с, которая обеспечивается реле времени *РВ1* и *РВ2*; от максимального тока — реле *РМ*; от потери возбуждения двигателя — реле обрыва поля *РОП*. В приведенной несколько упрощенной схеме не показаны защитные блокировки, контролирующие исправность вспомогательных агрегатов, и система сигнализации. При действии любой из перечисленных защит вступают в действие пневматические тормоза: рабочий на валу двигателя и предохранительный на валу приводного шкива.

Для повышения безопасности работы канатной дороги ее остановка возможна и из кабины. При этом цепью для сигналов управления служат канаты. Тянувший канат изолируется от земли, а несущий — заземляется. Для связи кабины со станцией имеется телефон, действующий также через канаты, и коротковолновая радиосвязь.

Глава шестая

ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ НЕПРЕРЫВНОГО ТРАНСПОРТА

6-1. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ ПРИВОДОВ МЕХАНИЗМОВ НЕПРЕРЫВНОГО ТРАНСПОРТА

При движении конвейера приводной двигатель должен преодолевать статическую нагрузку, обусловленную силами трения во всех движущихся элементах, а также составляющую силы тяжести транспортируемого груза на наклонных участках конвейера. Силы трения возникают в подшипниках вращающихся элементов, в местах контакта роликов и катков с опорой, в тяговом элементе при его изгибах и вследствие значительной протяженности конвейера и большого количества движущихся элементов составляют значительную часть суммарной статической нагрузки, а для горизонтальных конвейеров определяют всю статическую нагрузку привода. Поэтому расчеты сил трения при проектировании электропривода конвейеров следует

выполнять весьма тщательно, так как именно эти силы определяют необходимую мощность и количество приводных двигателей.

Силы сопротивления движению конвейера можно разделить на две категории: силы, не зависящие от натяжения тягового элемента, и силы, зависящие от натяжения. Первые возникают на прямолинейных горизонтальных и наклонных участках

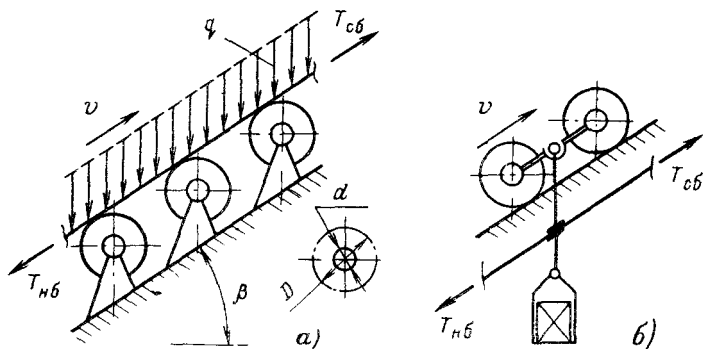


Рис. 6-1. Прямолинейные участки ленточного (а), цепного и канатного (б) конвейеров.

и распределены по участку равномерно (рис. 6-1, а, б). Вторые возникают на участках изгиба тягового элемента и сосредоточены в рамках дуги этого участка (рис. 6-2, а — в). В соответствии с рис. 6-1 сила сопротивления движению на прямолинейном участке определяется следующим образом:

$$\Delta F_{\Pi} = C_{\Pi} q l \cos \beta + q l \sin \beta = q l (C_{\Pi} \cos \beta + \sin \beta), \quad (6-1)$$

где q — весовая нагрузка на 1 м пути;

l — длина участка;

$C_{\Pi} = k_{\Pi} (\mu d/D + 2f/D)$ — результирующий коэффициент сопротивления движению на прямолинейном участке;

$k_{\Pi} = 1,1 \div 1,3$;

μ — коэффициент трения в подшипниках;

f — коэффициент трения качения роликов и катков.

Первое слагаемое (6-1) обусловлено потерями трения, а второе — составляющей веса перемещаемого по наклонному участку конвейера груза. При этом в расчетах следует принимать $\sin \beta > 0$ при движении на подъем и $\sin \beta < 0$ при движении на спуск. Значения коэффициентов μ и f приводятся в справочной

литературе и зависят от типа подшипников, роликов, катков и опор [13,14]. В приближенных расчетах можно пользоваться значениями C_{Π} , приведенными в приложении (см. табл. П-7).

На участках изгиба (рис. 6-2, а — в) сила сопротивления движению ΔF_{Π} состоит из двух слагаемых: силы от изгиба тягового элемента, пропорциональной натяжению в набегающей точке участка $T_{\Pi\delta}$, и силы трения в подшипниках блоков или

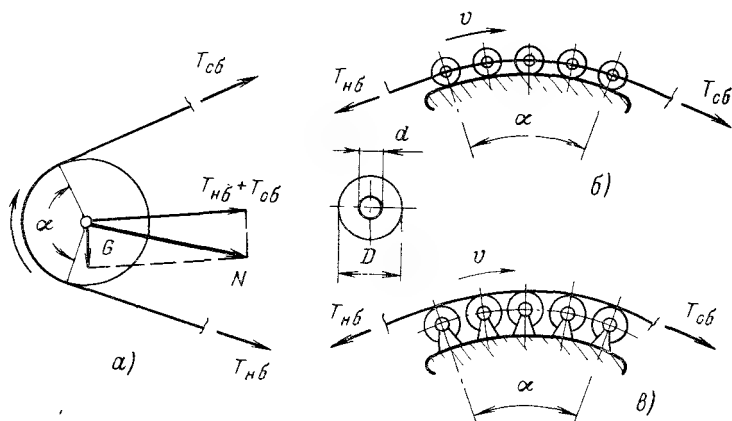


Рис. 6-2. Участки изгиба тягового элемента на блоке (а), шине (б) и батарее роликов (в).

роликов, пропорциональной равнодействующей силе N на участке. Следовательно,

$$\Delta F_{\Pi} = \xi T_{\Pi\delta} + N\mu \frac{d}{D}, \quad (6-2)$$

где ξ — коэффициент сопротивления от изгиба тягового элемента.

В конвейерных установках обычно выполняются условия: $T_{\Pi\delta} \gg G$ (рис. 6-2, а); $\Delta F_{\Pi} \ll T_{\Pi\delta}$. Поэтому при определении равнодействующей N можно пренебречь весом блока G и принять, что натяжения в набегающей $T_{\Pi\delta}$ и сбегающей $T_{\Sigma\delta}$ точках участка равны. Тогда (6-2) приводится к виду:

$$\Delta F_{\Pi} \approx C_{\Pi} T_{\Pi\delta}. \quad (6-3)$$

где $C_{\Pi} = \xi + 2\mu \frac{d}{D} \sin \frac{\alpha}{2}$ — результирующий коэффициент сопротивления на участке изгиба.

В литературе по конструированию конвейеров [13] приводятся теоретические формулы для расчета коэффициента ξ . Однако эти формулы оказываются сложными и неточными, поэтому на практике обычно пользуются экспериментальными значениями результирующего коэффициента сопротивления C_n , приближенные значения которого для различных конструк-

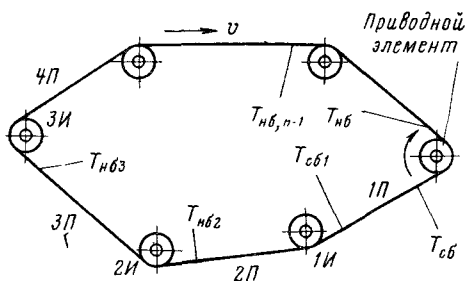


Рис. 6-3. Общая схема конвейерной линии.

тивных исполнений тягового элемента и условий работы конвейера приведены в приложении (см. табл. П-8).

Сила сопротивления вызывает увеличение натяжения тягового элемента на каждом участке.

Для прямолинейного участка

$$T_{сб} = T_{нб} + \Delta F_{п}; \quad (6-4)$$

для участка изгиба

$$T_{сб} = T_{нб} + \Delta F_{и} = k_n T_{нб}, \quad (6-5)$$

где $k_n = 1 + C_n$ — коэффициент увеличения натяжения на данном участке.

В общем случае конвейер может состоять из многих участков (рис. 6-3). Поскольку прямолинейные участки отделяются друг от друга участками изгиба, то во всей замкнутой конвейерной линии имеется одинаковое число n прямолинейных и криволинейных участков.

Тогда результирующая сила сопротивления движению определится как сумма сил всех участков:

$$\begin{aligned} F_{ст} &= \sum_{i=1}^n \Delta F_{п,i} + \sum_{i=1}^n \Delta F_{и,i} = \\ &= \sum_{i=1}^n q_i l_i (C_n \cos \beta_i + \sin \beta_i) + \sum_{i=1}^n C_{н,i} T_i. \end{aligned} \quad (6-6)$$

Так как силу $F_{ст}$ должен преодолеть приводной элемент, то очевидно, что при установившемся движении разность натяжений на нем уравнивается силой сопротивления:

$$F_{ст} = T_{нб} - T_{сб}. \quad (6-7)$$

Второе слагаемое в (6-6) зависит от натяжения, поэтому для расчета $F_{ст}$ необходимо последовательно определять натяжения на всех участках. При этом должно быть известно заранее натяжение в какой-либо точке тягового органа, которая и принимается за исходную в расчете. Предположим, что нам известно месторасположение приводного элемента и натяжение на его сбегавшей точке. Следуя от этой точки по направлению движения тягового элемента, пронумеруем все прямолинейные участки Π и участки изгиба I , как это показано на рис. 6-3. В соответствии с (6-6) и рис. 6-3, определив последовательно натяжения на входе участков изгиба, выразим $T_{нб}$ на приводном элементе через исходно принятое значение $T_{сб}$:

$$T_{нб1} = T_{сб} + \Delta F_{п1};$$

$$T_{нб2} = T_{нб1}k_{и1} + \Delta F_{п2} = T_{сб}k_{и1} + \Delta F_{п2} + \Delta F_{п1}k_{и1};$$

$$\begin{aligned} T_{нб3} &= T_{нб2}k_{и2} + \Delta F_{п3} = \\ &= T_{сб}k_{и1}k_{и2} + \Delta F_{п3} + \Delta F_{п2}k_{и2} + \Delta F_{п1}k_{и1}k_{и2}, \end{aligned}$$

.....

$$\begin{aligned} T_{нб,n} &= T_{нб} = T_{сб}k_{и1}k_{и2} \dots k_{и,n-1} + \Delta F_{п,n} + \\ &+ \Delta F_{п,n-1}k_{и,n-1} + \dots + \Delta F_{п1}k_{и1}k_{и2} \dots k_{и,n-1}. \end{aligned}$$

Полученное выражение для $T_{нб}$ в свернутой форме имеет вид

$$T_{нб} = k_{и} T_{сб} + F'_{п}, \quad (6-8)$$

причем результирующий коэффициент увеличения натяжения $k_{и}$ от всех участков изгиба (без приводного элемента) и результирующее усилие сопротивления $F'_{п}$ на прямолинейных участках трассы выражается формулами:

$$k_{и} = \prod_{i=1}^{n-1} k_{и,i}; \quad (6-9)$$

$$\begin{aligned} F'_{п} &= \Delta F_{п,n} + \Delta F_{п,n-1}k_{и,n-1} + \Delta F_{п,n-2}k_{и,n-2}k_{и,n-3} + \dots \\ &\dots + \Delta F_{п1}k_{и1} \dots k_{и,n-1}. \end{aligned} \quad (6-10)$$

Объединяя (6-7) и (6-8), получаем:

$$F_{ст} = T_{нб} - T_{сб} = (k_{и} - 1) T_{сб} + F'_{п}. \quad (6-11)$$

Выражение (6-11) позволяет при известном значении $T_{сб}$ определить результирующую силу сопротивления движению

без расчетов натяжений на всех промежуточных участках. Однако значение $T_{сб}$ заранее неизвестно и должно быть определено из дополнительных условий. Из (6-8) и (6-11) следует, что чем меньше $T_{сб}$, тем меньшими будут как максимальное натяжение цепи $T_{нб}$, так и $F_{ст}$. Однако по условиям работы конвейера регламентированы максимально допустимый провис тягового органа любого типа (цепь, канат, лента) и максимально возможное отношение $T_{нб}/T_{сб}$ для тягового органа, фрикционно соединенного с приводным элементом (лента, канат). Для выполнения отмеченных условий в тяговом органе с помощью натяжного устройства должно быть обеспечено определенное предварительное натяжение T_0 .

Задача определения $T_{сб}$ для цепных конвейеров решается так. При известном расположении приводной станции предположительно определяем точку конвейерной линии с минимальным натяжением. Этой точкой может оказаться точка сбегания на приводном элементе или самая низшая точка по ходу конвейера относительно приводного элемента при условии, что $\operatorname{tg} \beta > C_{п}$. Точке с минимальным натяжением приписывается заданное конструкторами, по условиям допустимого провеса, значение предварительного натяжения T_0 . По известному T_0 с помощью (6-4) и (6-5) определяется значение $T_{сб}$. Если $T_{сб} \geq T_0$, то точка минимального натяжения выбрана правильно; при $T_{сб} < T_0$ минимальное натяжение, равное T_0 , следует приписать точке сбегания на приводном элементе. По найденному значению $T_{сб}$ по (6-8) и (6-11) рассчитываются значения $T_{нб}$ и $F_{ст}$.

Для ленточных и канатных конвейеров на $T_{сб}$ и $T_{нб}$ накладывается условие Эйлера, исключающее пробуксовывание тягового элемента относительно приводного:

$$T_{нб}/T_{сб} < e^{\mu\alpha}, \quad (6-12)$$

где α — угол обхвата приводного элемента;

μ — коэффициент трения между тяговым и приводными элементами (см. табл. П-9).

Соотношение (6-12) совместно с (6-8) дает условие для выбора значения $T_{сб}$:

$$T_{сб} > F_{п}'/(e^{\mu\alpha} - k_{и}). \quad (6-13)$$

Выбираемое по (6-13) значение $T_{сб}$ должно иметь определенное превышение над правой частью неравенства (6-13), учитывающее возможные изменения коэффициента трения μ

в условиях эксплуатации, а также динамические нагрузки при пуске конвейера.

Выбрав согласно (6-13) значение $T_{сб}$, определим минимальное натяжение T_0 , которое, с другой стороны, должно удовлетворять условию допустимого провиса тягового органа. Таким образом, задача по определению статической нагрузки приводной станции конвейера оказывается комплексной. В процессе расчета силы сопротивления движению одновременно определяется минимально необходимое натяжение тягового элемента и точка его месторасположения на конвейерной линии. Эта точка оказывается оптимальным местом расположения натяжного устройства, так как при этом от него потребуются минимальное усилие.

Динамические нагрузки привода конвейера возникают в процессе пуска и определяются движущимися массами собственно конвейера и его приводной станции

$$F_{\text{дин}} = \sum_{i=1}^n m_i a_{\text{п}} + (J_{\text{дв}} i_{\text{р}}^2 + J_{\text{п}}) \frac{a_{\text{п}}}{R_{\text{п}}^2}, \quad (6-14)$$

где $F_{\text{дин}}$ — динамическая сила на обводе приводного элемента с радиусом $R_{\text{п}}$;

m_i — движущаяся масса одного прямолинейного участка совместно с массой предшествующего участка изгиба;

$J_{\text{дв}}, J_{\text{п}}$ — моменты инерции двигателя и приводного элемента;

$i_{\text{р}}$ — передаточное отношение редуктора приводной станции;

$a_{\text{п}}$ — ускорение конвейера при пуске.

Для тяжелых конвейеров динамическое усилие за счет большой поступательно движущейся массы может оказаться значительным и существенно превосходить силу статического сопротивления. При этом слагаемое, вызванное поступательно движущимися массами, может составлять 90% и более результирующего динамического усилия. Пуски конвейера с длительным режимом работы осуществляются редко и, как правило, вхолостую. Тем не менее высокий уровень динамических нагрузок и возможность пуска под нагрузкой после аварийной остановки вынуждают учитывать в расчетах силу $F_{\text{дин}}$. Так как при пуске результирующее усилие привода $F = F_{\text{ст}} + F_{\text{дин}}$ возрастает, то увеличивается максимальное натяжение в тяговом элементе за счет дополнительного приращения натяжения на каждом участке:

$$T_{сб,i} = T_{нб,i} + \Delta F_{п,i} + m_i a_{\text{п}}. \quad (6-15)$$

С учетом (6-15) результирующее натяжение на набегающем крае приводного элемента по сравнению с установившимся режимом (6-8) повысится:

$$T_{нб} = k_n T_{сб} + F'_n + m'_n a_n, \quad (6-16)$$

причем расчетная суммарная масса определяется выражением

$$m'_n = m_n + m_{n-1} k_{и,n-1} + \dots + m_1 k_{и1} k_{и2} \dots k_{и,n-1}. \quad (6-17)$$

Следовательно, условие (6-13) выбора значения $T_{сб}$ для ленточных и канатных конвейеров должно быть скорректировано с учетом (6-16):

$$T_{сб} \geq \frac{F'_n + m'_n a_n}{e^{\mu, \alpha} - k_{и}}. \quad (6-18)$$

Таким образом, динамические нагрузки при пуске конвейера могут существенно повысить как максимальное натяжение в тяговом элементе, так и необходимое значение предварительного натяжения T_0 . Чтобы исключить высокий уровень T_0 в установившемся режиме для крупных конвейерных установок, применяют вспомогательное натяжное устройство, которое создаст дополнительное натяжение только на период пуска конвейера.

6.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ И МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЯ ПРИВODНЫХ СТАНЦИЙ КОНВЕЙЕРОВ

Мощность приводной станции определяется в соответствии с расчетной статической нагрузкой $F_{ст}$ и заданной скоростью движения конвейера v :

$$P_c = k_3 \frac{F_{ст} v}{\eta_p} = k_3 \frac{(T_{нб} - T_{сб}) v}{\eta_p}, \quad (6-19)$$

где η_p — КПД редуктора приводной станции;
 $k_3 \approx 1,1 \div 1,3$ — коэффициент запаса, учитывающий неточности расчета силы сопротивления.

Момент сопротивления на валу двигателей приводной станции при известном передаточном отношении редуктора i_p определится по формуле

$$M_{ст} = k_3 \frac{F_{ст} D}{2 i_p \eta_p}, \quad (6-20)$$

где D — диаметр приводного элемента.

Номинальная мощность двигателей выбирается из условия

$$P_{ном} \geq P_c. \quad (6-21)$$

Силы трения покоя существенно больше, чем силы трения при движении конвейера, поэтому для конвейерных установок характерны повышенные моменты трогания, которые для наружных установок дополнительно возрастают в зимнее время. Это обстоятельство необходимо учитывать выбором приводного двигателя с повышенным пусковым моментом, обеспечивающим надежный пуск конвейера при возможном снижении напряжения питающей сети.

При определении величин T_0 , $T_{сб}$, $T_{иб}$ и $F_{ст}$ в § 6-1 место расположения приводной станции принималось заданным. Однако указанные величины в общем случае зависят от места приводной станции, и привод целесообразно располагать в такой точке трассы конвейера, которая обеспечивала бы минимум как максимального натяжения тягового органа T_{max} , так и его среднего значения по замкнутому контуру $T_{ср} = \frac{1}{l_{ср}} \oint T dl$. Это условие соответствует также минимально

возможному сечению тягового элемента и наименьшей статической нагрузке привода. Поэтому такое месторасположение приводной станции можно считать оптимальным. Для общего случая конвейерной трассы со сложной конфигурацией определить заранее однозначно оптимальное месторасположение привода не удастся. В этом случае рассматривается несколько вариантов расположения приводной станции и принимается тот из них, для которого оказываются наименьшими T_{max} и $T_{ср}$.

При выборе вариантов исходят из следующих соображений. Привод должен устанавливаться в конце рабочего участка. Это позволяет разгрузить последующую холостую ветвь конвейера от больших натяжений рабочего участка. Если в конвейере несколько рабочих участков, то к рассмотрению отбирают наиболее тяжелый, на котором происходит максимальное нарастание натяжения, а также участок, предшествующий самой длинной холостой ветви. Тогда, располагая привод в конце самого тяжелого участка, можно существенно уменьшить максимальные натяжения на последующих рабочих участках. Размещение привода перед самой длинной холостой ветвью позволяет снизить среднее по трассе натяжение. Для конвейеров, работающих на спуск грузов при тормозном режиме работы привода, последний устанавливается в начале рабочего участка по ходу тягового элемента.

В конкретных условиях для многих конвейеров задача по определению местоположения приводной станции решается просто и однозначно заранее без предварительных расчетов.

Так, для ленточных и канатных конвейеров, выполняемых обычно в односекционном варианте и имеющих одну рабочую (прямую) и одну холостую (обратную) ветви, привод располагается в конце рабочей ветви. При этом выполняется сформулированное выше условие в отношении натяжений тягового органа.

Пример 6-1. Требуется рассчитать мощность приводной станции ленточного конвейера, расчетная схема которого представлена на рис. 6-4. Технические данные: производительность $\Pi = 72 \cdot 10^3$ кг/ч; скорость $v = 0,8$ м/с, масса одного метра ленты $m_0^* = 10$ кг/м; углы обхвата приводного барабана $\alpha_{\Pi} = 210^\circ$ и натяжного барабана $\alpha_{\Pi} = 180^\circ$; длины и углы наклона к горизонту участка $l_{12} = 0,8$ м; $l_{34} = 80$ м; $l_{56} = 78$ м; $l_{78} = 3$ м; $\beta_{34} = \beta_{56} = 15^\circ$; $\beta_{12} = -30^\circ$; $\beta_{78} = 0$; допустимое ускорение $a_{\text{доп}} = 0,4$ м/с².

Согласно табл. П = 7 – П = 9 принимаем значения коэффициентов трения и сопротивления движению: $\mu = 0,1$; $C_{\Pi} = 0,025$; $k_{\Pi 1} = 1 + C_{\Pi 1} = 1,03$; $k_{\Pi 2} = 1 + C_{\Pi 2} = 1,05$; $k_{\Pi 3} = 1 + C_{\Pi 3} = 1,02$; $k_{\Pi 4} = 1,05$.

Масса 1 м транспортируемого груза в соответствии с заданной производительностью:

$$m_{\Gamma}^* = \frac{\Pi \cdot 10^3}{3600 v} = \frac{72 \cdot 10^3}{3600 \cdot 0,8} = 25 \text{ кг/м.}$$

Находим массы участков конвейера:

$$m_{12} = m_0^* l_{12} = 10 \cdot 0,8 = 8 \text{ кг; } m_{34} = 10 \cdot 80 = 800 \text{ кг;}$$

$$m_{56} = (m_0^* + m_{\Gamma}^*) l_{56} = (10 + 25) \cdot 78 = 2730 \text{ кг;}$$

$$m_{78} = 35 \cdot 3 = 105 \text{ кг.}$$

Расчетная суммарная масса согласно (6-17):

$$\begin{aligned} m_{\Sigma}' &= m_{78} + m_{56} k_{\Pi 3} + m_{34} k_{\Pi 3} k_{\Pi 2} + m_{12} k_{\Pi 3} k_{\Pi 2} k_{\Pi 1} = \\ &= 105 + 2730 \cdot 1,02 + 800 \cdot 1,02 \cdot 1,05 + 8 \cdot 1,02 \cdot 1,05 \cdot 1,03 = 3754 \text{ кг.} \end{aligned}$$

В соответствии с (6-1) рассчитываются силы сопротивления движению на прямолинейных участках:

$$\Delta F_{12} = q_0 l_{12} (C_{\Pi} \cos \beta_{12} - \sin \beta_{12}) = 9,81 \cdot 8 (0,025 \cdot 0,87 + 0,5) = 41 \text{ Н;}$$

$$\begin{aligned} \Delta F_{34} &= q_0 l_{34} (C_{\Pi} \cos \beta_{34} - \sin \beta_{34}) = 9,81 \cdot 800 (0,025 \cdot 0,97 - 0,26) = \\ &= -1,85 \cdot 10^3 \text{ Н;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta F_{56} &= (q_0 + q_{\Gamma}) l_{56} (C_{\Pi} \cos \beta_{56} + \sin \beta_{56}) = 9,81 \cdot 2730 (0,025 \cdot 0,97 + 0,26) = \\ &= 7,61 \cdot 10^3 \text{ Н;} \end{aligned}$$

$$\Delta F_{78} = 9,81 \cdot 105 \cdot 0,025 = 26 \text{ Н.}$$

Расчетное результирующее усилие на прямолинейных участках трассы согласно (6-10):

$$\begin{aligned} F_{\Pi}' &= \Delta F_{78} + \Delta F_{56} k_{\Pi 3} + \Delta F_{34} k_{\Pi 3} k_{\Pi 2} + \Delta F_{12} k_{\Pi 3} k_{\Pi 2} k_{\Pi 1} = \\ &= 26 + 7610 \cdot 1,02 - 1850 \cdot 1,02 \cdot 1,05 + 41 \cdot 1,02 \cdot 1,05 \cdot 1,03 = 5,86 \cdot 10^3 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Найденные значения m_{Σ}' и F_{Π}' позволяют рассчитать по (6-18) мини-

мально допустимое натяжение в точке сбегаия ленты с приводного барабана

$$T_{сб, min} = \frac{F'_n + m'_z a_{доп}}{e^{\mu\alpha} - k_{н1} k_{н2} k_{н3}} = \frac{5861 + 3754 \cdot 0,4}{e^{0,1 \cdot 3,66} - 1,02 \cdot 1,09 \cdot 1,03} = 27,4 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Так как при определении m'_z не учитывались массы барабанов и опорных роликов, то $T_{сб}$ следует принять с некоторым запасом относительно значения $T_{сб, min}$:

$$T_{сб} \approx 1,2 T_{сб, min} = 32,8 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Для определения предварительного натяжения ленты, обеспечивающего принятое значение $T_{сб}$, определим минимальное натяжение, которое имеет место в точке 4 (рис. 6-4):

$$T_4 = T_0 = (T_{сб} + \Delta F_{12}) k_{н1} + \Delta F_{34} = (32800 + 41) \cdot 1,02 - 1850 = 31,65 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Для создания такого натяжения потребуется натяжной груз весом $G_{н,у} = 2 \cdot T_0 = 62,3 \cdot 10^3 \text{ Н}$. Максимальное натяжение имеет место в набегающей точке приводного барабана и определяется по (6-16)

$$T_{нб} = k_n T_{сб} + F'_n + m'_z a_{доп} = 1,1 \cdot 32800 + 5861 + 3754 \cdot 0,4 = 45340 \text{ Н.}$$

Согласно (6-19) рассчитывается мощность приводной станции конвейера:

$$P_c = k_z \frac{T_{нб} - T_{сб}}{\eta_p} v = 1,2 \frac{45340 - 31650}{0,9} 0,8 \cdot 10^{-3} = 14,6 \text{ кВт.}$$

После выбора двигателя и редуктора уточняются значение КПД редуктора η_p , а также минимальный уровень $T_{сб}$ с учетом момента инерции двигателя.

Для конвейерных линий значительной протяженности и с большим числом тяжелых рабочих участков может оказаться, что даже оптимальное расположение приводной станции на

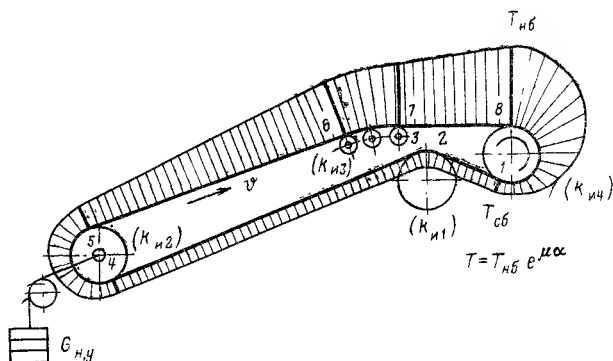


Рис. 6-4. Эпюра натяжения ленточного конвейера

трассе не обеспечивает снижения максимального натяжения до допустимого уровня. В таком случае задача решается заменой односекционного исполнения конвейера многосекционным или установкой на тяговом элементе нескольких приводных станций. Рассмотрим это на примере цепного подвесного конвейера, показанного на рис. 1-9, а. Пусть при условии, что 5П, 6П

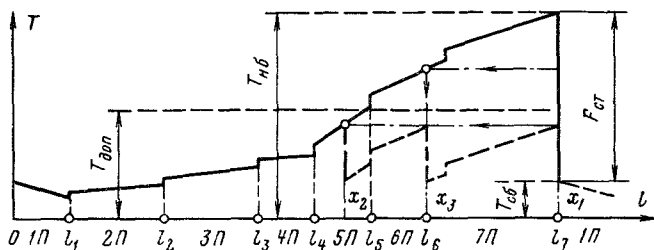


Рис. 6-5. Эпюра натяжения цепного конвейера.

и 7П — рабочие участки, расчет определил оптимальное положение для натяжной и приводной звездочек в точках соответственно 2 и 1. Тогда в соответствии с изложенной выше методикой определяются значения $F_{ст}$, P_c , $T_{max} = T_{нб}$ и строится эпюра натяжений вдоль трассы конвейера, развернутая по длине l (рис. 6-5). Так как $T_{max} > T_{доп}$, то для снижения значения T_{max} вместо одной приводной станции применим несколько, число которых n , очевидно, определится из условия:

$$n \geq F_{ст} / (T_{доп} - T_{сб}). \quad (6-22)$$

Предполагаем, что приводы строго идентичные и каждый из них развивает усилие $F_{ст}/n$. Пусть для рассматриваемого примера оказалось $n=3$. Тогда усилие и мощность каждой приводной станции составляет $1/3$ результирующих $F_{ст}$ и P_c для всего конвейера. Так как диаграмма натяжений (рис. 6-5) построена для фиксированного положения единой приводной станции, то положение одного из трех приводов оказывается известным. Два других привода должны быть разнесены по трассе конвейера так, чтобы максимальное натяжение тягового элемента ограничивалось значением:

$$T_{max} = T_{сб} + F_{ст}/n \leq T_{доп}. \quad (6-23)$$

Эта задача решается просто графическим путем. Отрезок $F_{ст}$ (рис. 6-5) делится на n равных частей и через точки деления отрезка проводятся прямые, параллельные оси абсцисс, до пересечения с диаграммой натяжения. Точкам пересечения на

оси абсцисс соответствуют места расположений приводных станций. В нашем случае места второй и третьей приводных станций имеют координаты соответственно x_2 и x_3 .

Полученные указанным способом координаты расположения приводных станций являются приближенными, так как в случае применения нескольких приводов уменьшаются натяжения и потери на участках изгиба, а следовательно, снижается результирующее усилие сопротивления движению. Поэтому при необходимости уточнить места расположения приводов следует выполнить перерасчет диаграммы натяжений с учетом изменившихся сопротивлений на участках изгиба. Решение рассмотренной задачи на практике часто корректируется конструктивными соображениями. По производственным условиям размещения конвейерной линии не всегда удастся расположить приводы в местах, определенных расчетом. Кроме того, расположение приводов в середине участков требует установки дополнительных звездочек. Поэтому обычно места расположения приводных станций заранее определяются из производственно-конструктивных соображений и, как правило, увязываются с предусмотренными на трассе поворотными звездочками. Расчет диаграммы натяжения при этом носит поверочный характер с целью определения максимального натяжения и выбора необходимого типа тягового элемента.

6.3. ОСОБЕННОСТИ СТАТИКИ И ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОНВЕЙЕРОВ

Механическая часть конвейеров представляет собой достаточно сложную систему с распределенными по длине конвейера параметрами: массой перемещаемого груза, массой и упругостью тягового органа, усилием статического сопротивления. Наличие упругих механических связей, как уже было показано в гл. 2, является фактором, способствующим возникновению колебаний, которые при неблагоприятных условиях существенно увеличивают динамические нагрузки рабочего оборудования. Движение системы с распределенными параметрами описывается дифференциальными уравнениями в частных производных, решение которых в общем виде представляет значительные математические трудности. Однако для качественного рассмотрения физических процессов, возникающих в пусковых режимах конвейеров, реальная механическая система может быть представлена упрощенной динамической моделью, в которой распределенные массы, упругости и силы заменены эквивалентными сосредоточенными.

Основой для составления модели может служить эпюра натяжений тягового органа конвейера в режиме пуска (рис. 6-6). Если в качестве условия эквивалентности принять равенство натяжений тягового органа на приводном элементе реальной системы натяжениям в соответствующих точках приводного элемента на модели, то динамическая модель подвижной части конвейера будет иметь вид представленной на рис. 6-7, а, а ее расчетная схема, приведенная к поступательному движению, — на рис. 6-7, б. На рис. 6-7, а, б: m_p , m_0 — результирующие массы

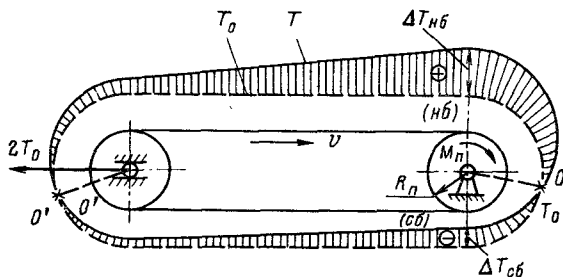


Рис. 6-6. Эпюра натяжения конвейера в режиме пуска.

соответственно рабочей и холостой ветвей конвейера с учетом приведенной к поступательному движению массы натяжного барабана; $m_p = (J_p + J_{дв} i_p^2) / R_p^2$ — масса привода, приведенная к поступательному движению; $c_{т,эк}$ — эквивалентная жесткость ветвей тягового органа; x_p , x_r , x_0 — координаты сосредоточенных масс соответственно m_p , m_r и m_0 ; $F_p = c_{т,эк} (x_p - x_r)$ и $F_0 = c_{т,эк} (x_p - x_0)$ — упругие усилия рабочей и холостой ветвей тягового органа; $F_{ст,r}$, $F_{ст,0}$ — результирующие усилия статического сопротивления рабочей и холостой ветвей тягового органа, причем $F_{ст,r} + F_{ст,0} = F_{ст}$; $F_p = M_p i_p / R_p$.

Движение привода согласно полученной динамической модели описывается системой дифференциальных уравнений.

$$\left. \begin{aligned} F_p - c_{т,эк} (x_p - x_0) - c_{т,эк} (x_p - x_r) &= m_p \ddot{x}_p; \\ c_{т,эк} (x_p - x_0) - F_{ст,0} + T_0 &= m_0 \ddot{x}_0; \\ c_{т,эк} (x_p - x_r) - F_{ст,r} - T_0 &= m_r \ddot{x}_r. \end{aligned} \right\} \quad (6-24)$$

Разрешая систему (6-24) относительно координаты перемещения привода x_p , получаем дифференциальное уравнение вида

$$\left(\frac{1}{\Omega_{p1}^2} p^2 + 1 \right) \left(\frac{1}{\Omega_{p2}^2} p^2 + 1 \right) p^2 x_p = \frac{F_p - F_{ст}}{m_p + m_r + m_0}. \quad (6-25)$$

Резонансные частоты механической части в (6-25) выражаются через собственные частоты свободных колебаний отдельных масс формулой

$$\Omega_{p1, p2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[2\Omega_n^2 + \Omega_p^2 + \Omega_0^2 \pm \sqrt{(\Omega_0^2 - \Omega_p^2)^2 + 4\Omega_n^4} \right]}, \quad (6-26)$$

где $\Omega_n = \sqrt{c_{т,эк}/m_n}$; $\Omega_p = \sqrt{c_{т,эк}/m_p}$; $\Omega_0 = \sqrt{c_{т,эк}/m_0}$.

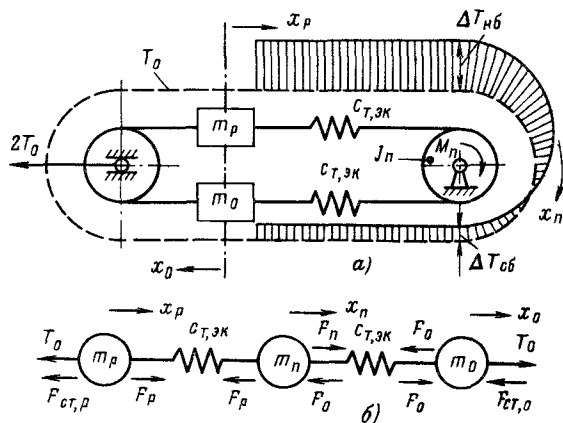


Рис. 6-7. Преобразованная эпюра натяжений конвейера (а) и его расчетная динамическая модель (б).

Уравнение (6-25) в силу принятого условия эквивалентности позволяет получить не только качественную картину движения привода, но и достаточно точные количественные результаты.

Таким образом, в процессе пуска при $F_n = \text{const}$ на среднее значение ускорения, определяемое правой частью уравнения (6-25), накладываются колебания с частотами Ω_{p1} и Ω_{p2} . Для тяжелых и длинных конвейеров из-за больших поступательно движущихся масс частоты Ω_p и Ω_0 существенно меньше Ω_n и вследствие этого резонансные частоты Ω_{p1} и Ω_{p2} значительно отличаются друг от друга. Пренебрегая значением $\Omega_0^2 - \Omega_p^2$ в (6-26), получаем:

$$\Omega_{p1} \approx \sqrt{2\Omega_n^2 + (\Omega_p^2 + \Omega_0^2)/2}; \quad (6-27)$$

$$\Omega_{p2} \approx \sqrt{(\Omega_p^2 + \Omega_0^2)/2}. \quad (6-28)$$

Если период низкочастотных колебаний ($T_{p2} = 2\pi/\Omega_{p2}$) превосходит время разгона привода до рабочей скорости, то на процессе пуска будут сказываться в основном только высокочастотные колебания. В этом случае низкочастотными колебаниями можно пренебречь

и упростить для анализа переходного процесса пуска дифференциальное уравнение (6-25):

$$\left(\frac{1}{\Omega_{pl}^2} p^2 + 1 \right) p^2 x_n \approx \frac{F_n - F_{ct}}{m_n + m_p + m_o}. \quad (6-29)$$

Решение уравнения (6-29) представлено графиком изменения ускорения привода на рис. 6-8. Максимальные значения ускорения существенно превышают его среднее. Это превышение тем больше, чем меньше масса привода относительно поступательно движущихся масс конвейера. Амплитудные значения ускорения создают опасность проскальзывания ленты или каната относительно приводного элемента.

Колебательный характер процесса пуска обуславливает динамические перегрузки тягового элемента. Возникшие при пуске колебания в действительности демпфируются за счет вязкого трения во всей подвижной части привода и главным образом внутри тягового элемента (штриховая линия на рис. 6-8).

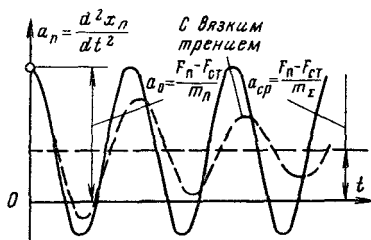


Рис. 6-8. Переходный процесс пуска конвейера с постоянным моментом двигателя.

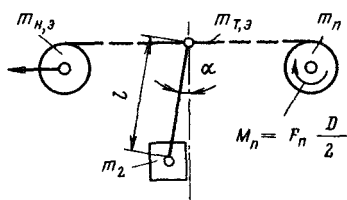


Рис. 6-9. Кинематическая схема подвижной части подвешенного конвейера.

В конце процесса пуска, когда двигатель выходит на жесткую механическую характеристику, колебания эффективно демпфируются за счет самого привода.

Наиболее тяжелый режим колебаний возникает при пуске ленточных конвейеров длиной в тысячи метров [15], используемых на открытых разработках полезных ископаемых. При пуске таких конвейеров приходится учитывать скорость распространения упругих колебаний вдоль тягового элемента. Если время пуска двигателя меньше времени распространения упругой волны от приводного элемента до натяжного, то двигатель успевает приобрести полную рабочую скорость, а хвостовой конец тягового элемента остается еще неподвижным. Это означает, что когда упругая волна дойдет до конца конвейера, то к его хвостовым массам прикладывается импульс полной рабочей скорости. Происходит упругий удар, подобный

рывку при выборе слабину каната приводом подъема крана. Упругая волна, отражаясь, возвращается к приводному элементу. Возникающие при этом волновые процессы аналогичны таковым в длинных линиях электропередач. Для того чтобы ослабить упругий удар и уменьшить распространяемый импульс скорости, в таких конвейерных линиях используют пуск на предварительную пониженную скорость и уже с этой скорости выполняют пуск на полную рабочую скорость.

Другим видом эластичной связи в механической части привода является гибкая подвеска транспортируемого груза (рис. 6-9). При пуске подвешенного конвейера возникает проблема устранения или уменьшения до допустимой нормы раскачивания груза. Если пренебречь упругостью тягового элемента, то его массу $m_{т.э}$ можно объединить с массой привода $m_{п}$ и натяжного элемента $m_{н.э}$:

$$m_1 = m_{т.э} + m_{п} + m_{н.э}.$$

Изобразив подвижную массу m_1 в виде тележки, к которой приложено динамическое усилие привода $F_{дин} = F_{п} - F_{ст}$, получим расчетную модель механической части привода, которая полностью совпадает с моделью механизма перемещения крана (см. рис. 2-10). Рассмотрим движение подвешенной массы с целью выяснения способов устранения раскачивания груза в процессе пуска применительно к электроприводу конвейеров. Используя исходные уравнения (2-20) и (2-21), разрешим их относительно линейного ускорения a_2 подвешенной массы m_2 :

$$\left(\frac{1}{\Omega_{12}^2} p^2 + 1 \right) a_2 = a_{п} = \frac{F_{дин}}{m_1 + m_2}. \quad (6-30)$$

Решение уравнения (6-30) имеет вид:

$$a_2 = a_{п} (1 - \cos \Omega_{12} t). \quad (6-31)$$

График изменения ускорения массы m_2 в процессе пуска конвейера с $F_{п} = \text{const}$ показан на рис. 6-10. По сравнению с крановыми механизмами проблема устранения раскачивания груза для подвесных конвейеров имеет свои особенности. Если на кранах эта проблема решается с помощью соответствующих действий опытного крановщика в процессе пуска, то для конвейеров такая возможность отсутствует. Пуск конвейера осуществляется из диспетчерского пункта автоматически, и оператор в формировании процесса пуска не участвует. Поэтому для подвесных конвейеров задача устранения раскачива-

ния груза полностью возлагается на автоматизированный соответствующим образом пуск привода.

В отличие от кранов для конвейеров характерны более короткие подвески и поэтому большие частоты свободных колебаний груза. На интервале продолжительного пуска конвейера укладывается несколько периодов таких колебаний, что позволяет в ряде случаев для устранения раскачивания груза использовать метод интерференции противофазных колебаний. Пуск

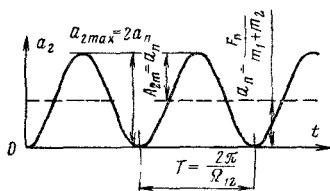


Рис. 6-10. Изменение ускорения подвешенного груза в процессе пуска конвейера.

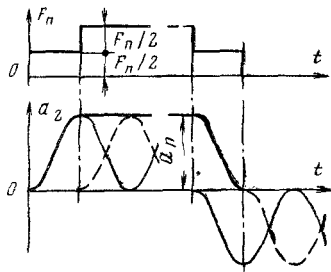


Рис. 6-11. Переходный процесс пуска подвесного конвейера при ступенчатом приложении приводного усилия.

выполняется в две ступени: сначала к механизму прикладывается половина пускового момента, а через полпериода свободных колебаний момент увеличивается до полного значения. В результате средние ускорения от двух слагаемых пускового момента суммируются, а периодические слагаемые ускорения компенсируются (рис. 6-11). В конце процесса пуска момент привода снимается также ступенчато. При этом на основной своей части процесс пуска протекает с постоянным допустимым ускорением без колебаний. В начале пуска масса m_2 отстает на некоторый угол α_0 от m_1 , а в конце пуска m_2 догоняет массу m_1 и отклонение α_0 исчезает. Величина α_0 определяет выбор значения ускорения привода $a_n = F_n / (m_1 + m_2)$. Так как

$$\Delta S = \int_0^{T/2} \left[\int_0^t (a_1 - a_2) dt \right] dt = \frac{2a_n}{g} l,$$

то

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{\Delta S}{l} = \arcsin \frac{2a_n}{g}. \quad (6-32)$$

Зная из условий эксплуатации допустимое значение α_0 , можно определить по (6-32) допустимое ускорение привода.

Реализация рассмотренного способа устранения раскачивания груза требует точной фиксации момента времени приложения второй ступени усилия привода, а также достаточно строгого постоянства F_{II} и, следовательно, связана со значительными техническими трудностями. Поэтому на практике чаще находит применение другой, более простой в реализации спо-

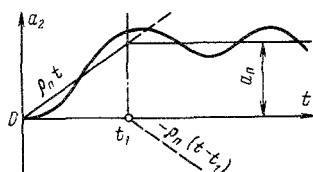


Рис. 6-12. Переходный процесс пуска подвешенного конвейера с ограничением рывка.

соб уменьшения раскачивания грузов путем дополнительного ограничения производной ускорения — рывка ρ (рис. 6-12).

Дифференциальное уравнение для первого интервала пуска сохраняет вид (6-30) с той лишь разницей, что правая часть уравнения оказывается линейной функцией времени:

$$\frac{1}{\Omega_{12}^2} \frac{d^2 a_2}{dt^2} + a_2 = \rho_n t. \quad (6-33)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$a_2' = \rho_n t - \frac{\rho_n}{\Omega_{12}^2} \sin \Omega_{12} t. \quad (6-34)$$

Для второго интервала пуска, где $a_n = \text{const}$, переходный процесс можно определить методом наложения. Для этого распространяем процесс первого интервала на второй и вычитаем из него аналогичный процесс, но смещенный в начальную точку второго интервала t_1 (рис. 6-12):

$$\begin{aligned} a_2'' &= a_2'(t) - a_2'(t - t_1) = \\ &= \rho_n t - \frac{\rho_n}{\Omega_{12}^2} \sin \Omega_{12} t - \rho_n (t - t_1) + \frac{\rho_n}{\Omega_{12}^2} \sin \Omega_{12} (t - t_1). \end{aligned}$$

После несложных преобразований получим:

$$a_2'' = a_n - A_{2m} \cos \Omega_{12} (t - t_1/2), \quad (6-35)$$

где

$$A_{2m} = 2 \frac{\rho_n}{\Omega_{12}^2} \sin \Omega_{12} \frac{t_1}{2}. \quad (6-36)$$

Для полного устранения колебаний достаточно выбрать продолжительность первого интервала t_1 , равную целому числу k периодов свободных колебаний T , т. е.

$$t_1 = k T = k \frac{2\pi}{\Omega_{12}}. \quad (6-37)$$

В этом случае согласно (6-36) $A_{2m} = 0$. В самом неблагоприятном варианте, когда $t_1 = (2k - 1) \frac{T}{2}$, амплитуда колебаний будет иметь наибольшее значение, равное $A_{2m} = 2 \frac{\rho_{\Pi}}{\Omega_{12}}$, а наибольшее превышение максимального ускорения a_{2max} над средним значением a_{Π} составит:

$$\begin{aligned} a_{2max}/a_{\Pi} &= 1 + A_{2m}/a_{\Pi} = \\ &= 1 + 2\rho_{\Pi}/\Omega_{12}\rho_{\Pi}t = 1 + \frac{2}{\pi} \approx 1,64. \end{aligned}$$

Таким образом, ограничением ускорения и рывка можно существенно снизить колебания подвешенного груза конвейера, возникающие в процессе пуска, и в значительной степени уменьшить динамические нагрузки тягового органа.

Одной из важных проблем для многодвигательного электропривода конвейеров является обеспечение равномерного распределения нагрузок между двигателями [1, 2, 4]. При параллельном включении двигателей, имеющих равные скорости идеального холостого хода и связанных общим механическим валом, нагрузка между ними распределяется пропорционально модулю жесткости их механических характеристик [1, 2, 4]. Применительно к двухдвигательному приводу моменты первого M_1 и второго M_2 двигателей определяются из соотношений:

$$M_1 = \frac{\beta_1}{\beta_1 + \beta_2} M_{ст}; \quad M_2 = \frac{\beta_2}{\beta_1 + \beta_2} M_{ст},$$

где β_1 и β_2 — модули жесткости механических характеристик первого и второго двигателей;

$M_{ст}$ — результирующий момент сопротивления приводной станции.

Если каждый из двух двигателей выбран на номинальный момент $M_{ном} = \frac{1}{2} M_{ст}$, то двигатель с большим значением β окажется перегруженным. При длительном режиме работы даже небольшая перегрузка может вывести из строя двигатель, поэтому важно обеспечить условие $\beta_1 = \beta_2$. Для выполнения этого условия применяют строго идентичные по исполнению, мощности и скорости двигатели. Если тем не менее жесткости их характеристик различаются, то, например, для асинхронных двигателей с фазным ротором более жесткая характеристика

смягчается за счет введения в роторную цепь дополнительного сопротивления.

В приводных станциях, где двигатели механически соединяются через упругий тяговый элемент, проблема выравнивания нагрузок по двигателям имеет свои особенности. Рассмотрим их на примере двухбарабанной приводной станции

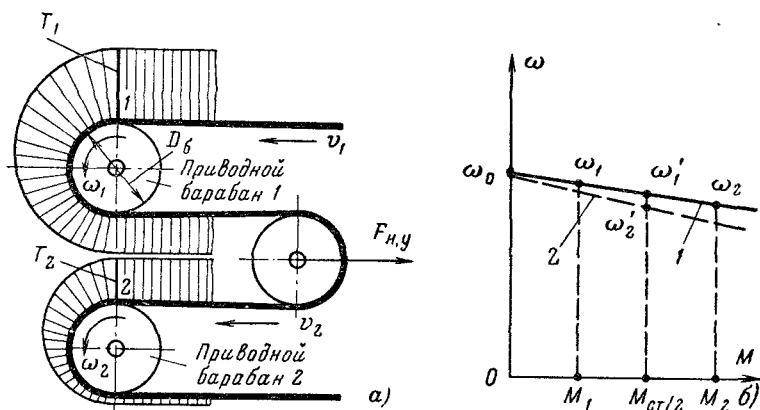


Рис. 6-13. Кинематическая схема с эпюрой натяжений двухбарабанной приводной станции (а) и механические характеристики привода (б).

ленточного конвейера (рис. 6-13, а). Натяжение T_2 ленты в точке набегаания 2 второго барабана меньше, чем натяжение T_1 в точке набегаания 1 первого барабана. Поэтому сечение ленты Q_1 и ее плотность γ_1 в точке 1 меньше, чем сечение Q_2 и плотность γ_2 ленты в точке 2. Так как масса ленты, проходящая в единицу времени, одинакова для любой точки конвейера, то можно записать:

$$v_1 Q_1 \gamma_1 = v_2 Q_2 \gamma_2, \quad (6-38)$$

где v_1, v_2 — линейные скорости ленты на входных точках первого и второго барабанов.

Изменения плотности ленты обусловлены изменениями ее объема при деформации растяжения, поэтому

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{(1 + \Delta l_2/l) Q_2}{(1 + \Delta l_1/l) Q_1}, \quad (6-39)$$

где $\Delta l_1/l; \Delta l_2/l$ — относительные удлинения ленты в точках 1 и 2, обусловленные натяжениями T_1 и T_2 соответственно.

Подставляя (6-39) в (6-38) и переходя к угловой скорости двигателей, получаем:

$$\delta = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{1 + \Delta l_2/l}{1 + \Delta l_1/l} = \frac{1 + T_2/EQ}{1 + T_1/EQ}, \quad (6-40)$$

где E — модуль упругости при растяжении тягового элемента;
 Q — сечение ленты в недеформированном состоянии.

Так как $T_1 > T_2$, то $\omega_1 > \omega_2$ и при идентичности механических характеристик двигатель, имеющий меньшую угловую скорость, испытывает большую нагрузку, чем другой (характеристика 1 на рис. 6-13, б). В общем случае модули жесткости β_1 и β_2 механических характеристик двигателей могут быть различными. При этом моменты первого и второго двигателей соответственно M_1 и M_2 составят:

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \beta_1 (\omega_0 - \omega_1), \\ M_2 &= \beta_2 (\omega_0 - \omega_2). \end{aligned} \right\} \quad (6-41)$$

Так как результирующий момент сопротивления

$$M_{ст} = M_1 + M_2,$$

то совместно с (6-41) и учетом того, что скорости двигателей связаны соотношением (6-40), получаем:

$$\frac{M_1}{M_{ст}/2} = \frac{2\beta_1}{\beta_1 + \delta\beta_2} \left[1 - \frac{\beta_2\omega_0}{M_{ст}} (1 - \delta) \right]; \quad (6-42)$$

$$\frac{M_2}{M_{ст}/2} = \frac{2\beta_2}{\beta_1 + \delta\beta_2} \left[\delta + \frac{\beta_1\omega_0}{M_{ст}} (1 - \delta) \right]. \quad (6-43)$$

Приравнявая (6-42) и (6-43), находим условие равномерного распределения нагрузки между двигателями

$$\beta_2 = \frac{\beta_1}{\delta + 2\beta_1 (1 - \delta) \omega_0 / M_{ст}}. \quad (6-44)$$

При выполнении этого условия каждый из двигателей будет развивать момент, равный $M_{ст}/2$, а скорости двигателей будут иметь значения соответственно ω'_1 и ω'_2 (характеристики 1 и 2 на рис. 6-13, б).

Пример 6-2. Требуется определить распределение нагрузки между асинхронными двигателями с фазным ротором, работающими на естественных характеристиках, двухбарабанной приводной станции (рис. 6-13, а) и рассчитать требуемую жесткость характеристики второго двигателя, обеспечивающую равномерное распределение нагрузки.

Технические данные: номинальные мощность и скольжение каждого двигателя $P_{\text{ном}} = 1000$ кВт, $s_{\text{ном}} = 1,5\%$; соотношение натяжений в набегающих точках $T_1/T_2 = e^{\mu\alpha} = 2$; относительное удлинение ленты в точке 1 $\Delta l_1/l = 0,015$; результирующий момент статического сопротивления $M_{\text{ст}} = 2M_{\text{ном}}$, где $M_{\text{ном}}$ — номинальный момент двигателей.

В соответствии с (6-40)

$$\delta = \frac{1 + 0,015/2}{1 + 0,015} = 0,99.$$

При работе двигателей на естественных характеристиках $\beta_1 = \beta_2 = \beta_0 = M_{\text{ном}}/s_{\text{ном}}\omega_0$, поэтому (6-42) и (6-43) преобразуются к виду

$$\left. \begin{aligned} \frac{M_1}{M_{\text{ном}}} &= \frac{2}{1 + \delta} - \frac{1}{s_{\text{ном}}} \frac{1 - \delta}{1 + \delta}; \\ \frac{M_2}{M_{\text{ном}}} &= \frac{2\delta}{1 + \delta} + \frac{1}{s_{\text{ном}}} \frac{1 - \delta}{1 + \delta}. \end{aligned} \right\} \quad (6-45)$$

Подставляя в (6-45) исходные данные, получаем:

$$\begin{aligned} \frac{M_1}{M_{\text{ном}}} &= \frac{2}{1 + 0,99} - \frac{1}{0,015} \cdot \frac{1 - 0,99}{1 + 0,99} = 0,67; \\ \frac{M_2}{M_{\text{ном}}} &= \frac{2 \cdot 0,99}{1 + 0,99} + \frac{1}{0,015} \cdot \frac{1 - 0,99}{1 + 0,99} = 1,33. \end{aligned}$$

Таким образом, двигатель барабана 1 оказывается недогруженным на 33%, а двигатель барабана 2 на 33% перегружен.

Определим требуемое скольжение $s_{\text{ном}2}$ второго двигателя, обеспечивающее одинаковость нагрузок двигателей. Полагая при этом $\beta_1 = \beta_2 = M_{\text{ном}}/s_{\text{ном}}\omega_0$ и $\beta_2 = M_2/s_{\text{ном}2}\omega_0$, из (6-45) получаем:

$$s_{\text{ном}2} = s_{\text{ном}}\delta + (1 - \delta) = 0,015 \cdot 0,99 + (1 - 0,99) = 0,025.$$

По найденному значению скольжения при номинальной нагрузке можно определить требуемую жесткость механической характеристики.

6-4. ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМОВ НЕПРЕРЫВНОГО ТРАНСПОРТА

Конвейеры в зависимости от их назначения и области применения могут эксплуатироваться в самых разнообразных условиях и в том числе крайне неблагоприятных: на открытом воздухе, на высоте над уровнем моря, превышающей 1000 м (ленточные конвейеры горнодобывающих предприятий, высокогорные канатные дороги), а также в помещениях, содержащих пары активных веществ и характеризующихся повышенной влажностью, загрязненностью, высокой температурой окружающей среды (красильные и сушильные линии, термиче-

ские цехи). Это определяет необходимость использования для данной группы механизмов электрооборудования, по типу и исполнению отвечающего перечисленным условиям, и выдвигает жесткие требования в отношении безопасности и простоты его обслуживания, надежности работы. Это в первую очередь относится к приводным двигателям, которые, как правило, должны иметь закрытое исполнение и обладать повышенным пусковым моментом.

Непрерывный, однонаправленный характер работы рассматриваемых механизмов определяет длительный режим работы их электроприводов, которые выполняются нереверсивными, за исключением редких случаев, где требуется изменение направления движения, например для эскалаторов. Конвейеры строго транспортного назначения имеют одну неизменную скорость движения и не требуют регулируемого электропривода. Для некоторых конвейеров, обслуживающих технологические процессы, например для сборочных конвейеров, красильных и сушильных линий и т. п., где при смене собираемого или обрабатываемого изделия требуется изменение скоростного режима, применяется регулируемый электропривод.

В современном поточном производстве работа нескольких конвейеров может объединяться общим производственным процессом. В этом случае движения отдельных конвейеров должны быть строго согласованы между собой по скорости. Такая задача возникает, например, когда различные изделия после необходимых технологических операций на отдельных конвейерных линиях должны встречаться на сборочном конвейере в точном позиционном соответствии друг с другом. К электроприводам таких конвейеров предъявляются требования согласованного вращения.

Важным общим требованием, предъявляемым к электроприводам механизмов непрерывного транспорта, является обеспечение плавности пуска и торможения с надежным ограничением ускорения и рывка, а также максимального момента двигателя и его производной. Для канатных и ленточных конвейеров большой протяженности это требование обусловлено наличием больших поступательно-движущихся масс, приведенный момент инерции которых может в 10–20 раз превышать момент инерции двигателей, и значительной податливостью тянущих канатов и транспортной ленты. Большие маховые массы установки увеличивают возможность пробуксовывания приводных барабанов и шкивов относительно лент и канатов при пуске. Резкое приложение момента при наличии упругих механических связей (см. § 6-3) вызывает механические

колебания при пуске, в результате чего в ленте или канате возникают дополнительные динамические усилия. Требование плавности пуска и замедления остается в силе и для установок с коротким тяговым элементом. В одних случаях ограничение ускорения и рывка до требуемых норм диктуется условиями транспортирования людей (эскалаторы, канатные дороги), в других случаях — условием надежного сцепления транспортируемых изделий с лентой (ленточные конвейеры) или уменьшением раскачивания люлек и кабин (подвесные конвейеры).

Перечисленные требования определяют выбор системы электропривода для данной группы механизмов. Наиболее распространенным типом электропривода механизмов непрерывного транспорта является нерегулируемый привод переменного тока на основе асинхронных или синхронных двигателей. Для установок, где не возникает необходимость регулирования скорости движения и момента при пуске, находят применение асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором с двойной беличьей клеткой или глубоким пазом, обладающие повышенным пусковым моментом при относительно неизменном его значении в процессе пуска и обеспечивающие меньший нагрев двигателя в условиях продолжительного пуска.

Мощность привода с асинхронным короткозамкнутым ротором ограничивается обычно несколькими сотнями киловатт. Использование двигателей большей мощности приводит к заметному снижению коэффициента мощности питающей сети, а также к существенному падению напряжения в сети при пуске конвейера. Применение синхронного двигателя для более мощных установок позволяет существенно повысить энергетические показатели привода. Однако установки такой мощности (например, крупные ленточные и канатные конвейеры) обладают большой механической инерционностью и характеризуются тяжелым продолжительным пуском, достигающим 30—100 с. Такой пуск может вызвать недопустимое превышение температуры синхронного двигателя, а также недопустимое снижение напряжения сети на относительно большом интервале времени разгона. Поэтому синхронные двигатели, несмотря на ряд их очевидных преимуществ, широкого распространения в качестве привода конвейерных установок не получили.

Проблема пуска мощных конвейеров успешно решается применением асинхронного двигателя с фазным ротором, при котором достигается ограничение пусковых токов и обеспечивается формирование требуемой пусковой характеристики привода (рис. 6-14). Предварительные ступени $1n$ и $2n$ ограничи-

вают ускорение двигателя в режиме выбора зазоров и в начале процесса пуска конвейера.

Переключение ступеней пусковых сопротивлений в процессе разгона двигателя вызывают скачкообразные изменения его момента в тем больших пределах, чем меньше число ступеней. Это может явиться причиной возникновения упругих механических колебаний и нарушить плавность переходных процессов.

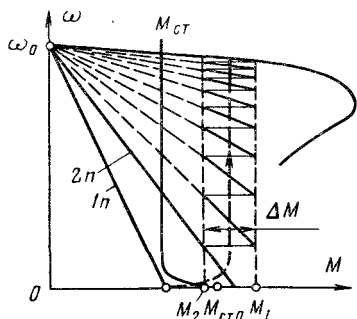


Рис. 6-14. Формирование процесса пуска конвейера с помощью дополнительных сопротивлений в роторной цепи асинхронного двигателя.

Поэтому при реостатном способе управления двигателем плавность пуска обеспечивается только за счет увеличения числа пусковых ступеней, снижающего величину $\Delta M = M_1 - M_2$ (рис. 6-14). Это вынуждает использовать громоздкие релейно-контакторные панели с большим количеством тяжелой коммутирующей аппаратуры.

Указанного недостатка лишена схема управления асинхронным электродвигателем с тиристорным коммутатором в роторной цепи (рис. 6-15, а), которая в переходных процессах обеспечивает практически идеальное поддержание тока ротора и момента двигателя на постоянном уровне, определяемом задающим напряжением $u_{з,т}$. Работа схемы построена на широтно-импульсном способе регулирования дополнительного сопротивления R_d роторной цепи. Тиристор T_l выполняет функцию ключа, попеременное включение и отключение которого изменяет эквивалентное дополнительное сопротивление роторной цепи в пределах от нуля, когда ключ замкнут, до значения R_d при разомкнутом ключе. Этим предельным значением эквивалентного сопротивления соответствуют механические характеристики 1 и 2 на рис. 6-15, б.

Управление тиристорным ключом осуществляется релейным регулятором тока $РТ$ в функции выпрямленного тока ротора I_d . При $\Delta u_T = u_{з,т} - u_{о,т} > 0$ регулятор тока подает управляющий импульс на тиристор T_l . Тиристор T_l , открываясь,

шунтирует сопротивление R_d , что вызывает возрастание тока I_d . При этом через открывшийся тиристор $T1$ происходит заряд конденсатора C от источника питания ИП. Когда разность Δu_T становится меньше нуля, регулятор тока подает управляющий импульс на тиристор $T2$, который, открываясь, создает разрядный контур для конденсатора C . Под действием разрядного тока конденсатора C тиристор $T1$ запирается, а конденсатор C продолжает перезаряжаться от напряжения роторной цепи. По окончании процесса перезаряда тиристор $T2$ запирается. Введенное сопротивление R_d снижает ток I_d , и при $\Delta u_T > 0$ вновь открывается тиристор $T1$. При этом образуется колебательный контур $C-L1$, способствующий быстрому перезаряду конденсатора. Благодаря диоду $D2$, включенному в этот колебательный контур, процесс перезаряда заканчивается, как только ток конденсатора снизится до нуля, и конденсатор остается заряженным со знаком «+» на нижней обкладке. Если теперь при снижении тока I_d разность Δu_T снова станет больше нуля, вновь будет открыт тиристор $T2$ и процесс повторится.

Включенный в цепь выпрямленного тока ротора реактор L_a снижает пульсации выпрямленного тока и момента и обеспечивает на начальном участке пуска плавное его нарастание (рис. 6-15, б).

В электроприводе конвейерных установок, предъявляющих повышенные требования к плавности пуска, находит применение система, в которой движение от нерегулируемого синхронного или асинхронного с короткозамкнутым ротором двигателя передается на механизм через регулируемую гидравлическую, порошковую или электромагнитную муфту. Схема электропривода с электромагнитной муфтой скольжения и его механические характеристики представлены на рис. 6-16, а, б. Передаваемый муфтой момент определяется ее магнитным по-

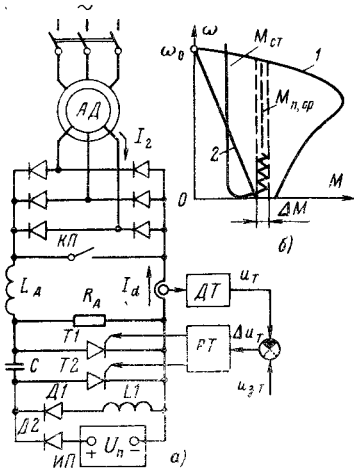


Рис. 6-15. Схема (а) и механические характеристики (б) асинхронного электропривода с тиристорным коммутатором.

током или током возбуждения I_b , соответствующее регулирование которого в функции скорости обеспечивает требуемое значение момента при пуске. К достоинствам данной системы следует также отнести: простоту и надежность электропривода; облегченный пуск двигателя, осуществляемый при невозбужденной муфте; возможность плавного изменения жесткости механической характеристики, благодаря чему сравнительно

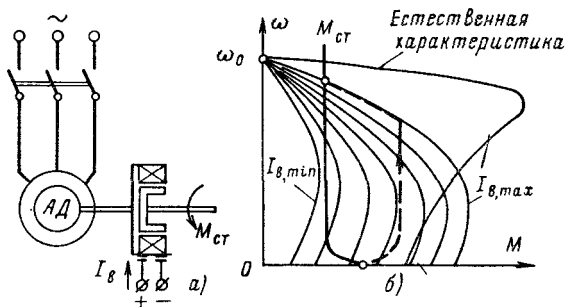


Рис. 6-16. Схема (а) и механические характеристики (б) асинхронного электропривода с электромагнитной муфтой скольжения.

просто обеспечивается равномерное распределение нагрузки между двигателями в многодвигательных электроприводах. Недостатками системы являются повышенные потери скольжения в муфте и увеличенные габариты привода, так как установленная мощность муфты равна мощности приводного двигателя.

Для конвейеров, где по условиям технологического процесса требуется длительный режим работы привода на низких скоростях, перспективна система тиристорный преобразователь частоты — асинхронный двигатель, в которой может осуществляться регулирование как скорости, так и ускорения.

Проблема согласованного движения конвейеров, входящих в единый производственный комплекс, успешно решается с помощью электропривода, выполненного по системе электрического вала. Практическое применение получил вариант синхронного вращения двигателей с общим асинхронным преобразователем частоты, показанный на рис. 6-17 применительно к двум синхронизированным конвейерным линиям. Схема обеспечивает синхронное вращение двигателей Д1 и Д2 не только в установившемся режиме, но и в процессе пуска [2, 4]. Угловое рассогласование двигателей определяется разностью моментов сопротивления на их валах. Для получения меньших

углов рассогласования двигателя включены на вращения против поля. Согласованное регулирование скорости конвейеров осуществляется изменением скорости преобразователя частоты ПЧ либо путем переключения ступеней добавочного сопротивления в роторной цепи двигателя АД, вращающего преобразователь частоты, либо изменением передаточного отношения редуктора Р между двигателем АД и ПЧ.

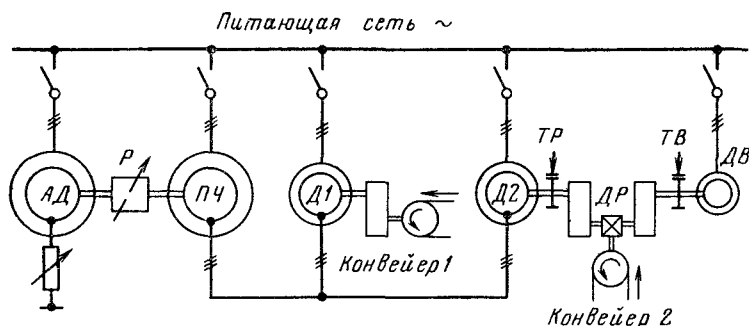


Рис. 6-17. Схема электропривода с асинхронным преобразователем частоты для согласованного движения конвейеров.

Синхронное вращение двигателей еще не обеспечивает строго взаимного согласования положения транспортируемых разными конвейерами изделий, так как в процессе эксплуатации происходит вытяжка тягового элемента, неодинаковая для различных конвейеров. Это приводит к рассогласованию взаимного положения изделий, для устранения которого привод конвейера снабжен вспомогательным двигателем ДВ (рис. 6-17), соединенным с основным рабочим двигателем Д2 через дифференциальный редуктор ДР. При отставании или опережении второй конвейерной линии двигатель ДВ освобождается от механического тормоза ТВ и включается на некоторое время, в результате чего происходит увеличение или уменьшение скорости конвейера и восстанавливается взаимное согласованное положение транспортируемых двумя конвейерами изделий. Мощность вспомогательного двигателя из-за малой его скорости незначительна и составляет 5–10% мощности рабочего двигателя. Вспомогательный привод может использоваться и самостоятельно в режиме малой скорости конвейера. При этом рабочий двигатель отключается от сети и затормаживается тормозом ТР.

Рассмотренная схема электропривода достаточно проста

и надежна. Однако повышенная общая установленная мощность привода, превышающая примерно в 4 раза установленную мощность рабочих двигателей и повышенные потери электроэнергии, ограничивают область ее рационального применения установками небольшой мощности.

При высоких требованиях к точности согласованного движения конвейеров задача успешно решается использованием системы управляемый тиристорный преобразователь — двигатель постоянного тока, в которой строгое согласование движения достигается работой электроприводов в следящем режиме. Однако такая система электропривода оказывается гораздо сложнее, чем рассмотренная выше.

6-5. АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ НЕПРЕРЫВНОГО ТРАНСПОРТА

Целью автоматизации механизмов непрерывного транспорта является повышение их производительности и надежности работы. Требования к уровню автоматизации данных механизмов определяются прежде всего характером выполняемых ими функций.

Эскалаторы, многокабинные пассажирские подъемники и кольцевые пассажирские канатные дороги выполняют самостоятельные функции, поэтому автоматизация этих механизмов сводится в основном к автоматизированным пуску и торможению электропривода с ограничением ускорения и рывка и обеспечению необходимых защит и блокировок, гарантирующих безопасность пассажиров. Следует отметить, что для установок, транспортирующих людей необходимо присутствие человека, контролирующего работу установки. Поэтому часть функций управления может быть возложена на оператора, что упрощает схему и повышает надежность ее работы.

Для конвейеров, которые выполняют часть функций в общем технологическом процессе производства, автоматизация подчинена задачам комплексной автоматизации данного производства. Входящие в технологические комплексы конвейерные установки могут представлять собой сложные поточно-транспортные системы большой протяженности. Управление ими и контроль исправности механического и электрического оборудования сосредоточивается в диспетчерском пункте, где с помощью световых табло, мнемонических схем и звуковой сигнализации диспетчер следит за работой конвейеров. В эксплуатационных целях, для ремонта, ревизии и наладки отдельных конвейерных линий наряду с централизованным пред-

усматривается также местное управление с пульта, располагаемого непосредственно в границах приводной станции. Элементы схемы управления приводом конвейера, расположенные на пульте местного управления, приведены на рис. 6-18. При централизованном управлении из диспетчерского пункта включение и отключение контактора пуска *КП* выполняется соответственно с помощью реле *РУВ* и *РУО*. При переводе переключателя *ПР* в положение *МУ* (местное управление) приводную станцию можно отдельно включать и выключать с помощью кнопок «Вкл» и «Откл». Переключатель *ПУ* позволяет, отключив привод от дистанционного управления, связаться по телефону *ТФ* с диспетчерским пунктом.

В общем случае в зависимости от характера технологического процесса система автоматизации комплекса конвейерных линий промышленного предприятия должна осуществлять включение и отключение различных конвейеров в определенной последовательности в строгом соответствии с производственным процессом; обеспечение требуемой скорости транспортировки грузов и при необходимости согласование значений скорости различных конвейеров, а также технологические и аварийные блокировки оборудования. Нарушения в работе оборудования могут привести к нарушению всего технологического процесса (конвейеры) или к опасности для жизни людей (канатные дороги, эскалаторы). Поэтому в схемах автоматизации данных установок применяется большое число защитных блокировок. Наиболее типовые из них, обусловленные особенностями работы данных механизмов, выполняют следующие функции:

- 1) контроль исправного состояния тягового элемента (ленты, каната, цепи) и отключение установки при чрезмерной вытяжке тягового элемента, слабом натяжении, сходе с направляющих роликов, отводных барабанов и шкивов;
- 2) отключение установки при чрезмерном повышении скорости;
- 3) отключение установки при затянувшемся пуске,
- 4) предупреждение завалов бункеров загрузочных и перегрузочных устройств;

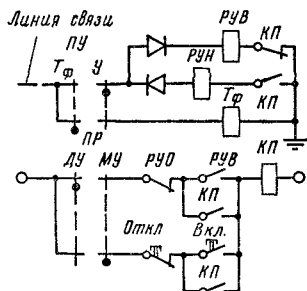


Рис. 6-18. Элементы схемы управления пуском и остановкой конвейера на пульте местного управления.

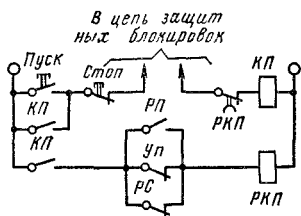


Рис. 6-19 Схема узла контроля пуска конвейера.

5) обеспечение требуемой последовательности пуска и останова механизмов технологического комплекса.

Первые две защиты осуществляются с помощью конечных выключателей и реле скорости. Следует иметь в виду, что из-за возможного проскальзывания каната или ленты на приводном шкиве или барабане скорость двигателя еще не характеризует скорость тягового элемента, поэтому датчики скорости должны фиксировать движение именно тягового элемента. Для этого они устанавливаются либо на опорном ролике для конвейеров (обычно на его обратной нерабочей ветви) либо на отводном шкиве для канатных дорог. В качестве датчика скорости широко используются бесконтактные индукционные датчики, в которых вращающийся ротор — постоянный магнит создает в неподвижной статорной обмотке ЭДС, пропорциональную скорости. При обрыве тянущего элемента реле скорости дает сигнал на отключение электропривода. В механизмах, транспортирующих людей (например, канатные дороги), дополнительно включаются ловители, не позволяющие кабине разогнаться под уклон. Защита от чрезмерного увеличения скорости работает аналогично и выполняется с помощью реле центробежного типа.

Пуск конвейеров из-за больших инерционных масс и статических нагрузок отличается значительной продолжительностью и сопровождается существенным нагревом двигателей. Перегрузка конвейера, пониженное напряжение питания, некоторые виды неисправности в механическом и электрическом оборудовании могут приводить к дополнительному затягиванию процесса пуска и вследствие этого к недопустимому превышению температуры двигателя. Кроме того, перегрузка ленточных или канатных конвейеров может привести к пробуксовыванию тягового элемента на приводном органе. При этом закончившийся процесс пуска двигателя не выводит конвейер на рабочую скорость, а затянувшееся буксование приводит к порче тягового элемента, поэтому во всех случаях затянувшегося пуска конвейера сверх регламентированного времени привод необходимо отключить. Это осуществляется автоматически с помощью узла контроля пуска (рис. 6-19).

Контактор пуска *КП* включает силовую цепь двигателя,

а также реле контроля пуска *РКП*, выдержка времени срабатывания которого незначительно превышает время нормального пуска. В конце процесса пуска цепь *РКП* разрывается контактом контактора последней ступени ускорения *У_п* при условии, ток двигателя снизился до расчетного значения и реле перегрузки *РП* отключилось; тяговый элемент приобрел рабочую скорость и размыкающий контакт реле скорости *РС* разомкнулся. При отключении цепи питания реле *РКП* оно прекращает отсчет времени и его контакт в цепи *КП* остается замкнутым. При затянувшемся пуске цепь питания *РКП* остается включенной через контакт *РП* при перегрузке двигателя или через контакт *РС* при буксовании приводного элемента. По истечении выдержки времени *РКП* оно срабатывает, отключает контактор и пуск прекращается.

Чтобы избежать завалов перегрузочных устройств в многосекционном ленточном конвейере, требуется определенная последовательность включения и отключения его двигателей. При пуске секции конвейера включаются поочередно, начиная с хвостового участка разгрузки, в порядке, противоположном направлению грузопотока [17]. При остановке секции конвейера отключаются в порядке следования участков по направлению грузопотока, начиная от головного участка загрузки. Поочередное включение двигателей позволяет одновременно уменьшить пусковые токи в питающей сети. Поочередный пуск конвейерных линий целесообразно выполнять в функции скорости тягового элемента. Это гарантирует включение каждой последующей секции после выхода предшествующей на уровень рабочей скорости. Остановка конвейеров при условии полной разгрузки всех секций и исключения завалов перегрузочных бункеров выполняется по принципу времени. При этом сначала прекращается загрузка головной секции, а выдержки времени на поочередное отключение секций соответствуют длительности, необходимой для полной разгрузки каждой секции. Если в процессе работы отключится одна из линий, то должны поочередно отключиться все предшествующие по направлению грузопотока линии.

Принципиальная схема управления, обеспечивающая указанные операции для трех конвейерных линий, изображена на рис. 6-20. Пуск конвейера осуществляется с центрального пульта универсальным переключателем *УП* при условии, что защитная цепь реле готовности пуска *РГП* замкнута. При этом, как следует из схемы, вначале включается пусковой контактор двигателя хвостового участка *КПЗ*. Двигатель второго участка включится после того, как скорость третьего участка достигнет

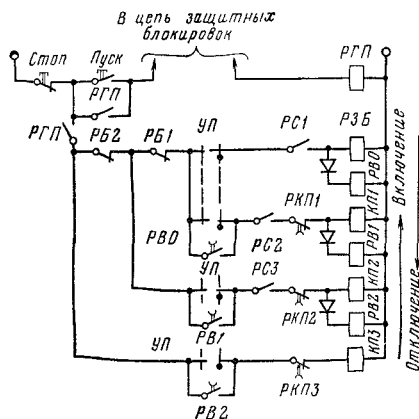


Рис. 6-20. Схема управления поочередным пуском многосекционного ленточного конвейера.

рабочего значения и сработает реле скорости $РС3$. Двигатель загрузочного участка включится после окончания пуска второго участка, когда сработает реле скорости $РС2$ и получит питание $КП1$. В последнюю очередь включается реле загрузочного бункера $РЗБ$, подающее команду на загрузку конвейера.

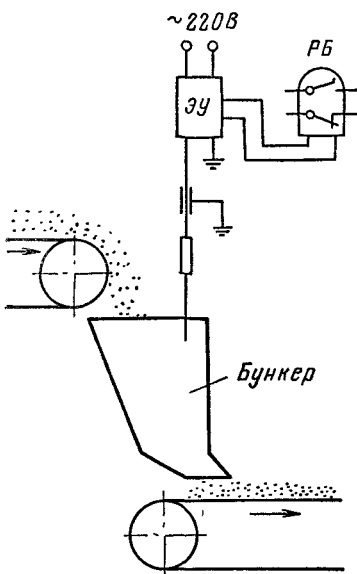


Рис. 6-21. Электродный датчик уровня загрузки бункера.

Отключение двигателей с помощью $УП$ происходит в обратном порядке, но уже в функции времени. Сначала отключается $РЗБ$, дающее команду на закрытие загрузочного бункера. Далее через выдержки времени реле $РВ0$, $РВ1$ и $РВ2$ поочередно отключаются $КП1$, $КП2$, $КП3$ и соответствующие им двигатели.

В схеме предусмотрена защита от завалов перегрузочных бункеров, отключающая с помощью контактов

РБ1 и *РБ2* участки конвейеров, которые предшествуют переполненному бункеру, а также загрузочный бункер. Для данной защиты находит применение электродный датчик уровня материала в бункере (рис. 6-21). При замыкании электрода на землю транспортируемым материалом срабатывает реле *РБ*, подключающее к выходу усилительного устройства датчика ЭУ. Высокая чувствительность датчика (до 30 мОм) позволяет его использовать практически для любого транспортируемого материала.

6-6. ПРИМЕРЫ СХЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМОВ НЕПРЕРЫВНОГО ТРАНСПОРТА

В настоящем параграфе рассмотрены схемы электроприводов некоторых механизмов непрерывного транспорта.

На рис. 6-22 показана принципиальная схема электропривода отдельных линий конвейера, скорости движения которых должны быть строго одинаковы. Такая необходимость возникает в поточном производстве, когда различные изделия после необходимых технологических операций на отдельных линиях должны встречаться на сборочном участке в строгом соответствии друг с другом. Схема позволяет одновременно пускать и останавливать несколько конвейерных линий и регулировать их скорость движения. Согласованное движение достигается включением двигателей по схеме синхронного вала с общим преобразователем частоты *ПЧ*. Регулирование скорости двигателей *Д1* и *Д2* осуществляется изменением скорости *ПЧ* с помощью редуктора *Р* с изменяемым передаточным отношением. Разрешение на пуск конвейеров дается операторами, следящими за работой конвейеров на наиболее ответственных участках. Нажатие на кнопки готовности *Г1* и *Г2* вызывает зажигание сигнальных ламп *ЛС1* и *ЛС2* и срабатывание реле *РГ1* и *РГ2*. Последние готовят цепь пускового реле *РП*. При нажатии на кнопку *Пуск* срабатывает *РП*, которое включает контактор *Л1*. Происходит однофазная синхронизация положения *ПЧ*, *Д1* и *Д2*. Через выдержки времени маятниковые реле, встроенные в контакторы *Л1* и *Л2*, последовательно включается *Л2*, отключается *Л1* и включается *Л3*. Осуществляется остаточный пуск двигателя преобразователя частоты по принципу времени (реле времени *РУ1*, *РУ2*, *РУ3*).

На рис. 6-23 приведена схема электропривода эскалатора метрополитена, позволяющая работать на подъем и спуск пассажиров. В качестве приводного двигателя используется асинхронный двигатель с фазным ротором мощностью до 200 кВт. В определенные часы суток при незначительном потоке пасса-

жиров эскалатор может длительно работать практически холостую. Для повышения коэффициента мощности и КПД двигателя при снижении нагрузки на его валу примерно до 40% номинальной статорная обмотка переключается с треугольника на звезду. При повышении нагрузки она вновь включается на

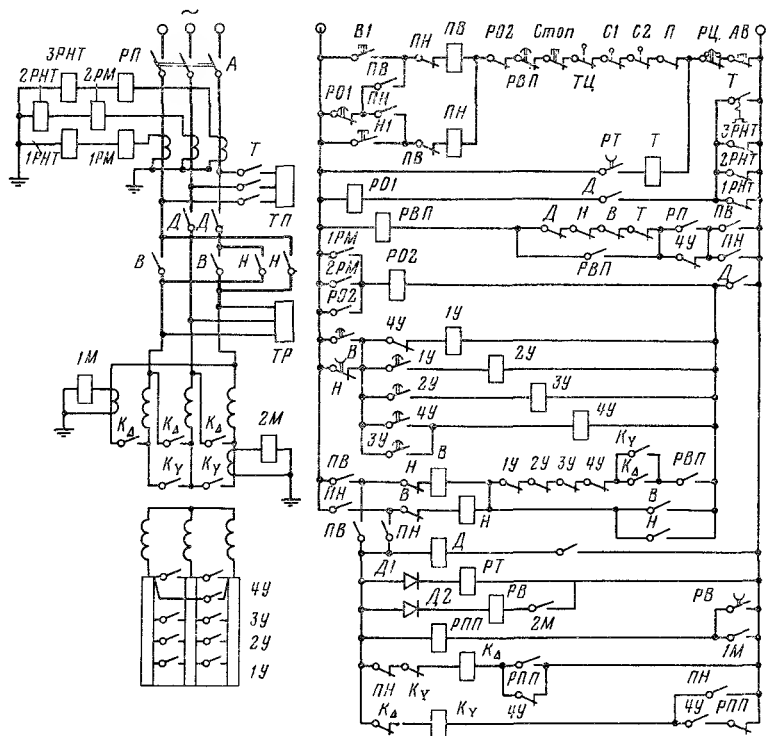


Рис. 6-23. Схема электропривода эскалатора метрополитена.

треугольник. Указанные переключения осуществляются автоматически с помощью реле максимального тока 1М и 2М, которые управляют контакторами k_{Δ} и k_{γ} через реле РПП и РВ. Контакт РВ с выдержкой времени на размыкание обеспечивает наличие цепи катушки РПП в период времени между отключением 2М и включением 1М.

В генераторном режиме спуска с полной нагрузкой двигатель загружен существенно меньше (из-за механических потерь установки), чем при аналогичной нагрузке в режиме подъема. Поэтому в режиме на спуск статорная обмотка двигателя всег-

да включена на звезду. Пуск двигателя осуществляется в функции времени с использованием маятниковых реле контакторов ускорения $1У-4У$. Торможение — механическое. При этом рабочий тормоз $ТР$ установлен на валу двигателя, а предохранительный $ТП$ — на валу приводной звездочки, с тем чтобы обеспечить остановку лестницы при нарушении механической связи между валами звездочки и двигателя.

Схема осуществляет описанные в предыдущем разделе типовые защитные блокировки: от неисправности механической части оборудования — вытяжка цепей и поручней (конечные выключатели $ТЦ$, $П$), нарушение конструкции ступеней (конечные выключатели $С1$ и $С2$), превышение температуры подшипников (тепловое реле $Т$); от превышения скорости (центробежное реле скорости $РЦ$). Кроме того, предусмотрена защита двигателя: максимальная (реле $1РМ$, $2РМ$), от перегрузки (реле $РП$), от потери двигателем питания (реле нулевого тока $1РНТ$, $2РНТ$, $3РНТ$), от приваривания замыкающих контактов силовых контакторов (размыкающие контакты $Д$, $Н$, $В$, $Т$ в цепи катушки $РВП$ и $1У-4У$ в цепи катушки $В$). Защита от потери питания, превышения температуры подшипников и перегрузки двигателя действует с выдержкой времени, определяемой реле времени $РО1$ и $РВП$. Все защиты, за исключением реле скорости $РЦ$, осуществляют остановку двигателя его отключением от сети и наложением рабочего тормоза $ТР$. Только в конце процесса торможения, после истечения выдержки времени реле $РТ$, накладывается дополнительно предохранительный тормоз $ТП$. При срабатывании реле скорости $РЦ$ или нажатии на кнопку $АВ$ аварийного останова одновременно накладываются оба тормоза.

Глава седьмая

ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ ЦЕНТРОБЕЖНОГО И ПОРШНЕВОГО ТИПОВ

7-1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ И МОЩНОСТИ НА ВАЛУ МЕХАНИЗМОВ

Режим работы механизмов центробежного типа определяется тремя величинами: подачей Q ; напором H и угловой скоростью ω . Эти величины определяют также момент сопротивления и мощность на валу механизма. Основы теории механизмов центробежного типа были разработаны Л. Эйлером.

В предположении бесконечного числа лопаток рабочего колеса и ламинарного движения жидкости вдоль лопаток (рис. 7-1) получены теоретические формулы для напора и подачи насосов:

$$\left. \begin{aligned} H &= \frac{uc \cos \alpha}{g} k_{\text{л}} \eta_{\text{г}}; \\ Q &= c_R F_{\text{к}} \eta_0 \varphi_{\text{л}}, \end{aligned} \right\} \quad (7-1)$$

где u , c — окружная и абсолютная скорости жидкости на выходе рабочего колеса;

α — угол между векторами скоростей $\bar{u}$ и $\bar{c}$;

c_R — радиальная выходная скорость жидкости;

$k_{\text{л}}$ — коэффициент, учитывающий конечное число лопаток, $k_{\text{л}} \approx 0,3$;

$\eta_{\text{г}}$ — гидравлический КПД насоса, учитывающий потери энергии внутри насоса, $\eta_{\text{г}} \approx 0,6 \div 0,9$;

η_0 — объемный КПД, учитывающий частичное замыкание потока жидкости внутри насоса, $\eta_0 \approx 0,95 \div 0,98$;

$\varphi_{\text{л}}$ — коэффициент, учитывающий снижение выходного сечения насоса из-за конечной толщины лопаток, $\varphi_{\text{л}} \approx 0,87 \div 0,95$;

$F_{\text{к}} = \pi D_{\text{к}} b$ — площадь выходной окружной поверхности рабочего колеса;

b — ширина лопатки на выходе колеса.

В соответствии с (7-1) напор характеризует приращение кинетической энергии элементарной струйки жидкости единичного веса на выходном конце лопатки рабочего колеса и имеет размерность длины: Дж/Н = м.

Так как линейные скорости u , c , c_R для одного и того же насоса пропорциональны его угловой скорости, то, полагая в (7-1) $\eta_{\text{г}}$ и η_0 неизменными, получаем так называемые законы пропорциональности насоса:

$$Q_1/Q_2 = \omega_1/\omega_2; \quad (7-2)$$

$$H_1/H_2 = (\omega_1/\omega_2)^2; \quad (7-3)$$

$$H_1/H_2 = (Q_1/Q_2)^2. \quad (7-4)$$

Эксплуатационные свойства механизмов центробежного типа определяются $Q - H$ -характеристикой и зависимостью КПД от подачи при $\omega = \text{const}$. Теоретический расчет указанных характеристик представляет большие трудности, поэтому на практике пользуются экспериментальными зависимостями $H = f(Q)$ и $\eta = \varphi(Q)$, которые приводятся в каталогах насосов для неизменной номинальной скорости $\omega_{\text{ном}}$. Чтобы получить

$Q - H$ -характеристики для скорости, отличной от номинальной, пользуются законами пропорциональности (7-2) – (7-4). Для этого задается ряд значений Q_e , которым соответствуют значения H_e на исходной естественной $Q - H$ -характеристике с $\omega_{\text{ном}} = \text{const}$ (рис. 7-2). В соответствии с (7-4) рассчитываются параболы $H = H_e(Q/Q_e)^2$, проходящие через выбранные точки на исходной характеристике. Каждой точке параболы согласно

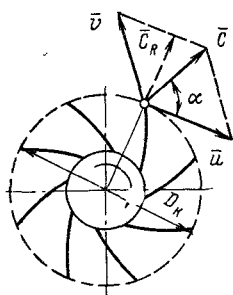


Рис. 7-1. Рабочее колесо механизма центробежного типа.

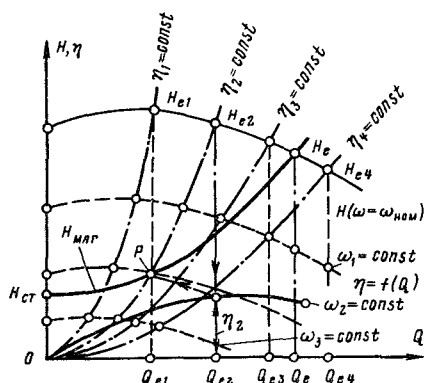


Рис. 7-2. $Q - H$ -характеристики механизмов центробежного типа.

(7-2) соответствует определенная скорость механизма $\omega = \omega_{\text{ном}} Q/Q_e$. Соединяя точки парабол с одинаковым значением ω , определяют $Q - H$ -характеристику для $\omega = \text{const}$. Так как законы пропорциональности получены в предположении постоянства η_r и η_o , то пересчетные параболы оказываются линиями постоянного КПД механизма.

Установившийся режим работы насоса при некоторой $\omega = \text{const}$ определяется графическим способом – точкой пересечения соответствующей $Q - H$ -характеристики и характеристики магистрали, подключенной к насосу:

$$H_{\text{маг}} = H_{\text{ст}} + k_{\text{маг}} Q^2, \quad (7-5)$$

где $H_{\text{ст}}$ – статический напор магистрали;

$k_{\text{маг}}$ – коэффициент сопротивления магистрали.

Из рис. 7-2 следует, что при уменьшении скорости ω рабочая точка механизма перемещается вниз по характеристике магистрали $H_{\text{маг}}$, что соответствует снижению подачи и напора.

Так как напор, как уже отмечалось выше, представляет со-

бой энергию, сообщаемую единице веса жидкости, а произведение подачи на плотность γ есть количество жидкости, проходящей через насос в единицу времени, то полезная мощность насоса определится произведением

$$P_{\text{пол}} = HQ\gamma g,$$

где g — ускорение свободного падения.

С учетом КПД насоса $\eta_{\text{нас}}$ мощность на его валу определится следующим образом:

$$P_c = \frac{\gamma Q H g}{\eta_{\text{нас}}}. \quad (7-6)$$

Для вентилятора напор H измеряется в единицах давления и его можно трактовать как энергию, сообщаемую единице объема газа. Тогда полезная мощность вентилятора определится произведением

$$P_{\text{пол}} = HQ,$$

а мощность на валу

$$P_c = HQ/\eta_{\text{вен}}, \quad (7-7)$$

где $\eta_{\text{вен}}$ — КПД вентилятора.

В практических расчетах напор h вентилятора измеряют в миллиметрах водяного столба*. В такой системе измерения

$$H = h\gamma_{\text{в}}g \cdot 10^{-3}, \quad (7-8)$$

где $\gamma_{\text{в}}$ — плотность воды;

h — напор, мм вод. ст.

Подставив (7-8) в (7-7) с учетом того, что $\gamma_{\text{в}} = 10^3$ кг/м³, получим:

$$P_c = \frac{hQg}{\eta_{\text{вен}}}. \quad (7-9)$$

Если скорость для расчетной точки отличается от номинальной, то соответствующее этой скорости значение КПД определяется следующим образом. Через расчетную точку (например, P на рис. 7-2) проводится парабола до пересечения с исходной $Q-H$ -характеристикой. Точка пересечения даст значение $Q_{\text{с2}}$, которое, в свою очередь, определяет по исходной кривой $\eta(Q)$ КПД η_2 .

* 1 мм вод. ст. = 10 Па.

Момент сопротивления на валу определяется через мощность:

$$M_{\text{ст}} = P_{\text{с}}/\omega. \quad (7-10)$$

В частном случае, когда отсутствует статический напор в магистрали $H_{\text{ст}} = 0$,

$$H_{\text{маг}} = H_{\text{е}} \left(\frac{Q}{Q_{\text{е}}} \right)^2 = H_{\text{е}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2. \quad (7-11)$$

В этом случае, подставляя (7-11) в (7-10) с учетом (7-6) и полагая $\eta = \eta_{\text{ном}}$, получаем:

$$M_{\text{ст}} = \frac{\gamma Q H g}{\eta \omega} = M_{\text{ст,е}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (7-12)$$

где $M_{\text{ст,е}} = \frac{\gamma Q_{\text{е}} H_{\text{е}} g}{\eta_{\text{ном}} \omega_{\text{ном}}}$ — момент сопротивления, соответствующий номинальной скорости механизма.

Таким образом, при отсутствии статического напора момент сопротивления пропорционален квадрату угловой скорости. При этом, очевидно, мощность пропорциональна кубу скорости. В общем случае, когда $H_{\text{ст}} = \text{const} \neq 0$, зависимость $M_{\text{ст}}$ от ω рассчитывается по точкам пересечения характеристики магистрали с $Q - H$ -характеристиками, координаты которых подставляются в (7-10). Указанный путь определения зависимости $M_{\text{ст}}$ от ω не дает ее аналитического описания. Однако в рабочем диапазоне изменения момента сопротивления от $M_{\text{ст,min}}$ до $M_{\text{ст,max}}$ для функции $M_{\text{ст}}(\omega)$ можно найти приближенное аналитическое выражение, используя для этой цели параболическую аппроксимацию:

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{ст,max}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ст,max}}} \right)^k. \quad (7-13)$$

Зная минимальную $\omega_{\text{ст,min}}$ и максимальную $\omega_{\text{ст,max}}$ скорости, соответствующие $M_{\text{ст,min}}$ и $M_{\text{ст,max}}$, определим показатель параболы k :

$$k = \frac{\lg \frac{M_{\text{ст,min}}}{M_{\text{ст,max}}}}{\lg \frac{\omega_{\text{ст,min}}}{\omega_{\text{ст,max}}}}. \quad (7-14)$$

На рис. 7-3 штриховыми линиями изображены механические характеристики, соответствующие формулам (7-10), (7-12), (7-13) для механизмов центробежного типа при $H_{\text{ст}} = 0$ и $H_{\text{ст}} =$

$= \text{const} \neq 0$. Сплошными линиями показаны реальные характеристики с учетом механических потерь трения.

Механизмы центробежного типа характеризуются длительным режимом работы. Поэтому номинальная мощность двигателя насосов и вентиляторов, работающих с неизменной скоростью, определяется из условия:

$$P_{\text{ном}} \geq P_c. \quad (7-15)$$

Перейдем к определению момента сопротивления и мощности поршневых компрессоров. По своему устройству компрессоры могут быть простого (одинарного) и двойного действия, а также одноступенчатые и многоступенчатые. В одноступенчатом компрессоре простого действия (рис. 7-4, а) в качестве рабочего используется только одно из двух движений поршня в цилиндре, а в компрессоре двойного действия (рис. 7-4, б) оба движения поршня используются как рабочие. Многоступенчатый компрессор представляет собой последовательное соединение нескольких одноступенчатых компрессоров с целью повышения результирующего давления. На рис. 7-4, в показано принципиальное устройство двухступенчатого компрессора простого действия.

Работа компрессора сопровождается пульсациями момента сопротивления на валу. В такте сжатия постоянная сила F давления газа на поршень вызывает момент сопротивления на валу компрессора, равный

$$M_{ct} = F\rho = pS_{\pi}R \sin \omega t = M_{ct,m} \sin \omega t, \quad (7-16)$$

где $\rho = R \sin \omega t$ — радиус приведения,

R — радиус кривошипа;

ω — угловая скорость вала компрессора;

p — выходное давление компрессора;

S_{π} — площадь поршня;

$M_{ct,m} = pS_{\pi}R_{\pi}$ — амплитудное значение момента сопротивления.

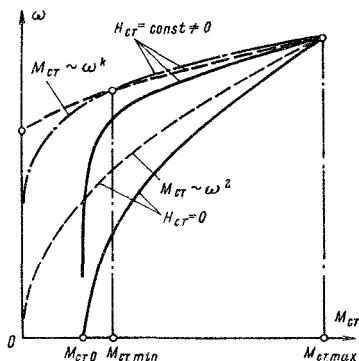


Рис. 7-3. Механические характеристики механизмов центробежного типа.

На рис. 7-5, а, б показано изменение момента сопротивления для компрессора одинарного и двойного действия. На среднюю величину момента накладывается периодическая составляющая с угловой частотой ω для компрессора одинарного действия и 2ω — двойного действия. Для двухступенчатого компрессора при том же объеме цилиндра второй ступени сила

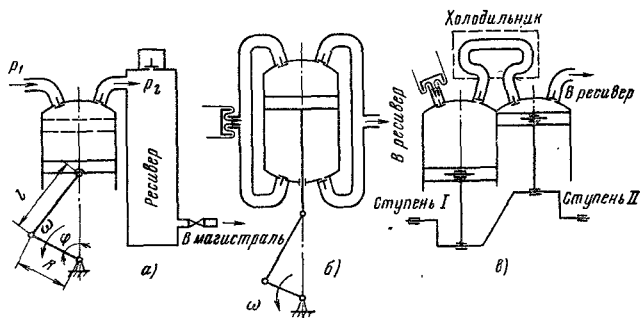


Рис. 7-4. Схема устройства поршневого компрессора одноступенчатого простого действия (а); двойного действия (б); двухступенчатого простого действия (в).

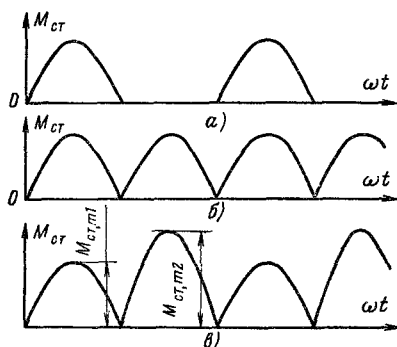


Рис. 7-5. Изменение момента сопротивления на валу компрессора простого действия (а); двойного действия (б); двухступенчатого (в).

и момент сопротивления в такт сжатия второй ступени оказываются большими из-за большего давления. Поэтому график изменения во времени статического момента приобретает вид изображенного на рис. 7-5, в. Таким образом, компрессоры простого действия, одноступенчатые и двухступенчатые характеризуются наибольшей неравномерностью хода. Для выравнивания графика нагрузки на валу таких компрессоров устанавливают маховик [2].

Мощность поршневого компрессора определяется по так называемой индикаторной диаграмме — зависимости давления p от объема под поршнем V . Индикаторная диаграмма для одноступенчатого компрессора простого действия показана на рис. 7-6. На участке 4—1 при перемещении поршня вниз происходит расширение оставшегося во вредном пространстве газа, давление которого снижается с уровня p_2 до уровня p_1 . В точке 1' открывается всасывающий клапан и при дальнейшем увеличении объема от V_1 до V_2 происходит всасывание газа при давлении, несколько меньшем p_1 вследствие потерь на прохождении газа через всасывающий канал. В точке 2 поршень начинает двигаться вверх, всасывающий клапан закрывается, и начинается такт сжатия (участок 2—3), который сопровождается выделением теплоты. Часть выделившейся теплоты отводится в систему охлаждения компрессора, поэтому процесс сжатия газа является политропическим, промежуточным между изотермическим и адиабатическим процессами. В точке 3 открывается нагнетающий клапан, соединяющий цилиндр с ресивером — аккумулятором сжатого до давления p_2 газа. Происходит выталкивание газа с давлением, несколько большим p_2 , что обусловлено сопротивлением движению газа через нагнетательный клапан и патрубок. В точке 4 цикл заканчивается.

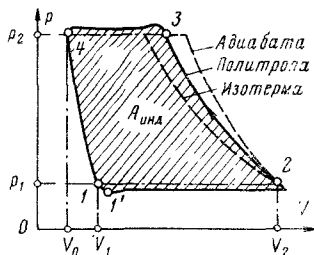


Рис. 7-6. Индикаторная диаграмма поршневого компрессора.

Площадь, ограниченная индикаторной диаграммой, характеризует работу $A_{\text{инд}}$, совершенную компрессором за цикл. Среднее за цикл давление выразится отношением

$$p_{\text{инд}} = A_{\text{инд}} / (V_2 - V_1) = A_{\text{инд}} / V_p, \quad (7-17)$$

где $V_p = V_2 - V_1$ — объем газа, всасываемого за цикл при давлении $p = p_1$.

Следовательно, средняя за цикл мощность определится выражением

$$P_c = p_{\text{инд}} Q_1' \eta_k = A_{\text{инд}} Q_1' / V_p \eta_k, \quad (7-18)$$

где Q_1 — подача компрессора, приведенная к давлению $p = p_1$
 η_k — КПД компрессора.

Для двухступенчатого компрессора индикаторная диаграмма оказывается составленной из двух частей, соответствующих ступеням I и II. При этом мощность определяется по (7-18), но значения $p_{\text{инд}}$ и $A_{\text{инд}}$ рассчитываются по результирующей диаграмме. Мощность на валу компрессора двойного действия находится также по (7-18), но результат вычисления удваивается.

Номинальная мощность двигателей компрессоров должна удовлетворять условию: $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{с}}$.

7-2. РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОДАЧИ МЕХАНИЗМОВ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ТИПА

Для многих механизмов центробежного типа возникает необходимость регулирования их подачи. Примерами таких установок являются газодувки газовых магистралей с изменяющимся потреблением газа в течение суток; дымососы, производительность которых зависит от режима топки котла; насосы в химической промышленности, участвующие в технологическом процессе производства жидких химических веществ, и т. п.

Наиболее простым в реализации является способ регулирования подачи при помощи дросселирования, путем введения в нагнетающую магистраль различных заслонок. Этот механический способ основан на изменении результирующего сопротивления магистрали. При неизменной скорости рабочая точка механизма перемещается по $Q-H$ характеристике в сторону снижения подачи до точки пересечения с новой характеристикой магистрали (рис. 7-7). При этом часть напора ΔH_p теряется на регулирующем устройстве. Для оценки КПД $\eta_{\text{м,с}}$ механического способа регулирования примем, что КПД механизма и двигателя остаются неизменными при изменении подачи. Тогда

$$\eta_{\text{м,с}} = \frac{H_{\text{маг}} Q_p}{(H_{\text{маг}} + \Delta H_p) Q_p} = \frac{H_{\text{ст}}}{H_p} + \frac{\Delta H_{\text{маг}}}{H_p}, \quad (7-19)$$

где $H_{\text{маг}}$ — напор в магистрали после регулирующего органа;

H_p — напор, создаваемый механизмом перед регулирующим органом;

$\Delta H_{\text{маг}}$ — потери напора в магистрали;

Q_p — подача механизма совместно с регулирующим органом.

Из (7-19) и рис. 7-7 следует, что КПД данного способа регулирования тем ниже, чем меньше статический напор $H_{\text{ст}}$. При $H_{\text{ст}} = 0$

$$\eta_{\text{м,с}} = \frac{\Delta H_{\text{маг}}'}{H_p} = \frac{H_{\text{ном}}}{H_p} \left(\frac{Q_p}{Q_{\text{ном}}} \right)^2 < \left(\frac{Q_p}{Q_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (7-20)$$

где $H_{\text{ном}}$ и $Q_{\text{ном}}$ — номинальные значения напора и подачи механизма.

Из (7-20) вытекает, что КПД снижается примерно квадратично от диапазона регулирования подачи $D = Q_{\text{ном}}/Q_p$. Следовательно, при

малом статическом напоре и больших требуемых диапазонах изменения подачи данный способ регулирования оказывается весьма неэкономичным. Это ограничивает область его практического применения главным образом маломощными установками с относительно небольшим требуемым диапазоном регулирования.

На насосных и газовых станциях, где несколько механизмов параллельно работают на общую магистраль, имеется возможность ступенчатого регулирования подачи отключением отдельных механизмов.

Рис. 7-7. $Q - H$ -характеристики при регулировании производительности задвижкой.

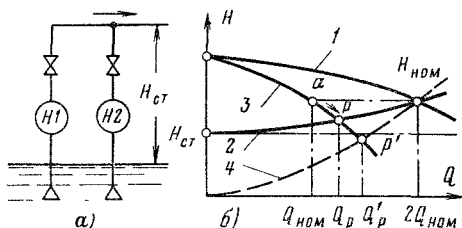
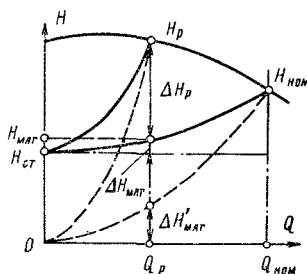


Рис. 7-8. Схема (а) и характеристики (б) при параллельной работе насосов.

Рассмотрим особенности такого способа регулирования на примере двухнасосной станции (рис. 7-8, а).

При параллельной работе насосов $H1$ и $H2$ их совместная подача определяется суммарной $Q - H$ -характеристикой и характеристикой магистрали (кривые 1 и 2 на рис. 7-8, б). Предположим что каждый из насосов работает в номинальном режиме с $Q_{ном}$ и $H_{ном}$, так что суммарная производительность насосов составляет $2 Q_{ном}$. При отключении одного из насосов режим оставшегося в работе насоса изменяется в соответствии с его $Q - H$ -характеристикой 3 (от точки a до точки p или p'). При этом его подача, определяемая точкой установившейся работы P , возрастает от $Q_{ном}$ до Q_p . Таким образом, при отключении одного насоса подача в магистрали снижается менее чем в 2 раза. Чем меньше статический напор $H_{ст}$, тем в меньшей степени снижается подача, тем менее эффективен данный способ регулирования (характеристика магистрали 4 на рис. 7-8). Пропорциональность регулируемой подачи количеству оставшихся в работе насосов имеет место теорети-

чески при отсутствии потерь в магистрали, когда насосы преодолевают только статический напор. Следует обратить внимание, что оставшийся в работе двигатель оказывается перегруженным по сравнению с его номинальным режимом при совместной работе. Действительно, при жесткой характеристике насоса напор снижается в меньшей степени, чем увеличивается подача, т. е. $H_{\text{ном}}Q_{\text{ном}} < H_p Q_p$. Следовательно, мощность на валу двигателя возрастает в отношении

$$P_p/P_{\text{ном}} = H_p Q_p / H_{\text{ном}} Q_{\text{ном}} \quad (7-21)$$

Поэтому при использовании данного способа регулирования необходимо предусматривать определенный запас по мощности двигателей. Для установок с большим статическим напором и малым уровнем потерь в магистрали завышение мощности привода оказывается незначительным. Достоинством рассмотренного способа является высокая экономичность, поскольку отсутствуют дополнительные потери при регулировании подачи, а недостатком — невозможность плавного регулирования подачи.

Наиболее универсальным является электрический способ регулирования подачи, при котором с помощью регулируемого электропривода изменяется угловая скорость механизма. При этом одновременно с уменьшением подачи снижается и напор (см. рис. 7-2) и согласно (7-19) КПД регулирования $\eta_{\Sigma} = 1$ (без учета увеличения потерь при снижении угловой скорости в самом электроприводе). Следовательно, электрический способ окажется более экономичным по сравнению с регулированием с помощью задвижки, если относительные дополнительные потери в электроприводе, вызванные снижением скорости, меньше относительного перепада напора $\Delta H_p/H_p$ в дросселирующем устройстве. Электрический способ создает широкие возможности автоматизации процесса регулирования подачи механизмов центробежного типа и позволяет исключить механические регулирующие устройства и тем самым повысить надежность работы установок, упростить их конструкцию.

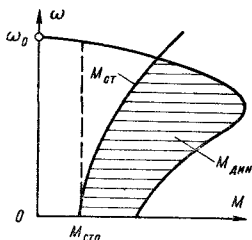
7-3. ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМОВ ЦЕНТРОБЕЖНОГО И ПОРШНЕВОГО ТИПОВ

Как следует из рассмотренного выше, механизмы центробежного и поршневого типов в силу особенностей их конструкции и условий технологического процесса не требуют реверсирования. Их скорость согласуется со скоростью двигателя, поэтому электропривод этих установок выполняется безредукторным и поставляется обычно комплектно с механизмом.

Отличительной особенностью рассматриваемой группы механизмов являются облегченные условия их пуска. Эти механизмы как в нормальных условиях, так и после аварийного

отключения пускаются, как правило, вхолостую. При этом момент трогания не превышает 30—35% номинального момента. Для установок вентиляторного типа, которые пускаются под нагрузкой, момент сопротивления плавно возрастает с увеличением скорости, что благоприятно согласуется с формой механической характеристики асинхронного двигателя. В результате прямой пуск вентилятора с асинхронным короткозамкнутым двигателем или синхронным двигателем с асинхронной пусковой обмоткой происходит под действием практически неизменного динамического момента $M_{дин}$ (рис. 7-9). Отмеченные осо-

Рис. 7-9. Динамический момент при пуске привода механизма центробежного типа.



бенности механизмов центробежного и поршневого типов позволяют в большинстве случаев для их привода использовать нерегулируемые асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. В установках значительной мощности (сотни — тысячи киловатт) целесообразно применение синхронных двигателей, позволяющих активно влиять на результирующую реактивную мощность, потребляемую из сети промышленным предприятием.

На некоторых крупных установках вентиляторного типа (гребные винты, шахтные вентиляторы, дымососы, аэродинамические трубы и т. п.) суммарный момент инерции электропривода значительно превышает момент инерции двигателя. При этом прямой пуск оказывается затянутым и сопровождается существенным нагревом обмоток асинхронного короткозамкнутого или синхронного двигателя. Поэтому в электроприводе указанных установок находят применение асинхронные двигатели с фазным ротором и в том случае, когда регулирование скорости не требуется. Реостатный способ пуска таких двигателей облегчает процесс разгона установки, уменьшает пусковые токи и нагрев обмоток двигателей.

Многие насосные и вентиляторные установки (в химической промышленности, в шахтах, в системах водоснабжения и канализации и т. п.) работают в условиях агрессивной, взрывоопасной среды, при высоких температурах и влажности. Для таких

установок применяются преимущественно асинхронные короткозамкнутые двигатели закрытого исполнения. Для особо тяжелых условий эксплуатации используются двигатели специальной конструкции.

В установках, требующих плавного и автоматического регулирования подачи, электропривод выполняется регулируемым. Характеристики механизмов центробежного типа создают благоприятные условия работы регулируемого электропривода как в отношении статических нагрузок, так и требуемого диапазона регулирования скорости. Действительно, как это следует из полученных в § 7-1 механических характеристик, при уменьшении скорости по крайней мере квадратично снижается и момент сопротивления на валу двигателя. Это облегчает тепловой режим двигателя при работе на пониженной скорости. Из законов пропорциональности (7-2)–(7-4) вытекает, что требуемый диапазон регулирования скорости при условии отсутствия статического напора $H_{ст} = 0$ не превышает заданный диапазон изменения подачи

$$D = \omega_{ном}/\omega_{min} = Q_{ном}/Q_{min}. \quad (7-22)$$

Если $H_{ст} = \text{const} \neq 0$, то для изменения подачи от нуля до номинального значения $Q_{ном}$ необходим диапазон регулирования скорости

$$D = \omega_{ном}/\omega_{min} = \sqrt{H_0/H_{ст}}, \quad (7-23)$$

где H_0 — напор, развиваемый механизмом при $Q = 0$ и $\omega = \omega_{ном}$.

При высоком уровне статического напора, например составляющем 80% H_0 , снижение скорости лишь на 10% уже обеспечивает уменьшение подачи практически до нуля. В среднем для регулируемых механизмов центробежного типа требуемый диапазон регулирования скорости обычно не превосходит 2:1. Отмеченные особенности данных механизмов и невысокие требования в отношении жесткости механических характеристик позволяют успешно применять для них простые в реализации варианты регулируемого асинхронного электропривода.

Для установок сравнительно небольшой мощности (7–10 кВт) задача регулирования успешно решается с помощью системы регулятор напряжения — асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. В настоящее время в качестве регулятора напряжения все большее применение находит тиристорный коммутатор (рис. 7-10, а). Вентиляторная механическая характеристика нагрузки позволяет обеспечить устойчивую ра-

боту электропривода по системе ТК — АД в достаточно большом диапазоне скорости без обратных связей (рис. 7-10, б).

Обычно изменение технологического режима, в котором участвует регулируемый электропривод, протекает достаточно медленно и не требует от привода высокого быстродействия. Поэтому в качестве регулятора напряжения может быть использован и трехфазный магнитный усилитель МУ, вклю-

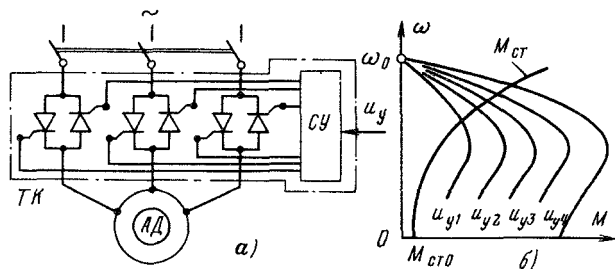


Рис. 7-10. Схема (а) и механические характеристики (б) системы ТК — АД с вентиляторной нагрузкой на валу.

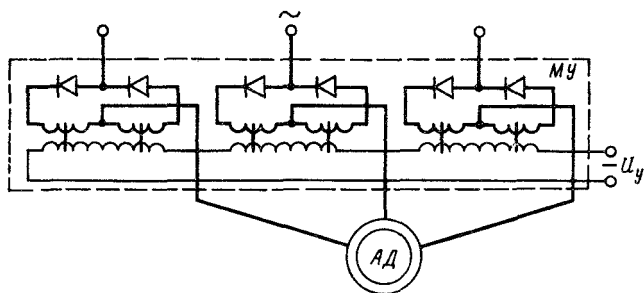


Рис. 7-11. Схема системы МУ — АД.

ченный в цепь статора (рис. 7-11). Этот аппарат хотя и обладает электромагнитной инерционностью, однако отличается простотой исполнения и высокой надежностью в работе. Магнитный усилитель МУ с внутренней положительной обратной связью по току (с самоподмагничиванием) работает в режиме, близком к режиму регулятора напряжения. Поэтому механические характеристики такой системы привода аналогичны характеристикам системы ТК — АД.

Развитие полупроводниковой техники позволяет в настоящее время достаточно просто реализовать импульсный способ

регулирования скорости асинхронного двигателя. На рис. 7-12,а приведена принципиальная схема включения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с импульсным изменением активного сопротивления его статорной цепи. Тиристорный ключ $ТК$, замыкаясь на время t_3 и размыкаясь на время t_0 , изменяет среднее за цикл коммутации $T_k = t_3 + t_0$ значение дополнительного сопротивления $R_{д.ср}$. Сопротивление

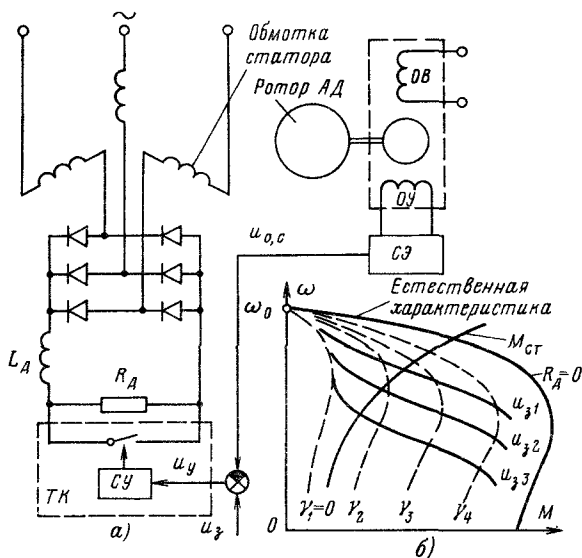


Рис. 7-12. Схема (а) и механические характеристики (б) системы импульсного регулирования сопротивления в статорной цепи.

$R_{д.ср}$ пропорционально скважности широтно-импульсной модуляции $\gamma = t_3 / T_k$

$$R_{д.ср} = R_d \gamma. \quad (7-24)$$

Регулируя скважность γ , можно получить семейство механических характеристик электропривода, изображенных штриховыми линиями на рис. 7-12, б, причем $R_{д.ср} = R_d$ при $\gamma = 0$ и $R_{д.ср} = 0$ при $\gamma = 1$. Параметр γ зависит от управляющего напряжения u_y на входе системы управления тиристорным ключом СУ. Так как критическое скольжение двигателя уменьшается при увеличении $R_{д.ср}$, то диапазон скоростей устойчивой работы привода даже при «вентиляторной» характеристике механизма оказывается весьма незначительным.

Введение отрицательной обратной связи по скорости обеспечивает жесткие механические характеристики и устойчивую работу замкнутой системы электропривода в требуемом для механизма диапазоне скоростей. Механические характеристики электропривода с обратной связью по скорости показаны на рис. 7-12, б сплошными линиями для трех значений задающего напряжения u_z . Регулируемые приводы многих механизмов центробежного типа работают в тяжелых условиях окружающей среды, что затрудняет использование коллекторных машин. Поэтому часто в качестве датчика обратной связи по скорости применяются тахогенераторы переменного тока.

При выполнении системы управления тиристорным ключом на постоянном токе управляющая обмотка OU двухфазного тахогенератора $TГ$ соединяется с системой управления тиристорным ключом $СУ$ через согласующий элемент $СЭ$, который в простейшем случае для нереверсивного привода представляет собой выпрямительный мост.

Общим недостатком рассмотренных вариантов регулируемого электропривода является выделение потерь скольжения при снижении скорости в самом двигателе. Эти потери вызывают дополнительный нагрев двигателя и требуют соответствующего завышения установленной мощности двигателя. Вопрос об определении необходимого завышения номинальной мощности привода для данного класса механизма будет рассмотрен ниже.

В установках, где по условиям эксплуатации допустимо применение асинхронного двигателя с фазным ротором, возможности регулируемого электропривода расширяются. Введение дополнительного сопротивления в цепь ротора позволяет вывести часть потерь скольжения из обмоток двигателя. Благодаря этому снижается необходимое завышение габарита двигателя и появляется возможность расширить диапазон мощностей привода при рассмотренных выше способах регулирования скорости. Например, импульсный способ регулирования окажется более целесообразным применительно к коммутации дополнительного сопротивления в роторной цепи (рис. 7-13, а). При этом механические характеристики привода обеспечивают устойчивую работу в достаточно большом диапазоне скоростей при разомкнутой системе электропривода (рис. 7-13, б). По своим характеристикам данный способ аналогичен реостатному. Его достоинство по сравнению с реостатным способом — возможность плавного регулирования сопротивления.

Для мощных приводов находят применение асинхронные и синхронные двигатели в сочетании с регулируемыми муфта-

ми скольжения. В варианте электропривода с гидромуфтой угловая скорость ведомой полумуфты изменяется за счет изменения подачи жидкости в полость муфты. По экономичности данный способ регулирования аналогичен реостатному. Потери мощности скольжения выносятся при этом из роторной цепи двигателя и выделяются в муфте. Механические характеристики электропривода с гидромуфтой показаны на рис. 7-14. Ско-

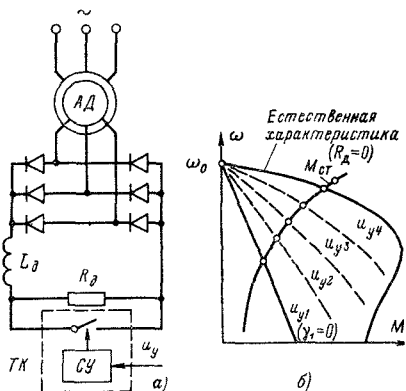
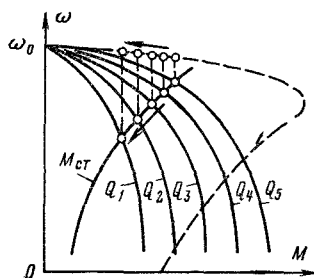


Рис. 7-13. Схема (а) и механические характеристики (б) системы импульсного регулирования сопротивления в роторной цепи.

Рис. 7-14. Механические характеристики электропривода с гидромуфтой.



рость ведущей полумуфты, соединенной с валом двигателя, изменяется в соответствии с его механической характеристикой. Скорость ведомой полумуфты, соединенной с валом механизма, изменяется согласно с его характеристикой и характеристикой муфты.

Во всех рассмотренных вариантах имеют место значительные потери скольжения, которые бесполезно рассеиваются в виде теплоты в обмотках двигателя, в регулировочных сопротивлениях либо в муфте скольжения, и КПД электропривода оказывается низким. Поэтому для электроприводов рассматриваемых механизмов мощностью в сотни и тысячи киловатт на-

ходят применение каскадные варианты регулирования скорости, в которых потери скольжения возвращаются в сеть либо на вал двигателя.

На рис. 7-15 приведена схема вентильного каскада с возвращением потерь скольжения в сеть. Эта схема нашла применение для электропривода газодувки. Напряжение ротора приводного асинхронного двигателя выпрямляется с помощью

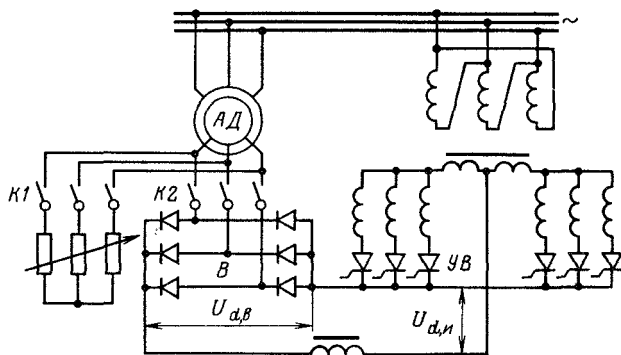


Рис. 7-15. Схема асинхронно-вентильного каскада.

неуправляемых вентилей B , собранных по трехфазной мостовой схеме. Выпрямленное напряжение подается на группу управляемых вентилей $УВ$, работающих в инверторном режиме и включенных по шестифазной схеме. Выпрямленное напряжение ротора в промежуточной цепи постоянного тока

$$U_{d,B} = 1,35 E_{2\kappa} s - 2\Delta U_B - I_d \left(\frac{x_{дs}}{\pi/3} + 2R_d \right)$$

уравновешивается средним напряжением инвертора в той же цепи

$$U_{d,и} = 1,17 E_{2T} \cos \beta + \Delta U_B + I_d \left(\frac{x_T}{\pi/3} + R_T \right).$$

При этом в цепи постоянного тока протекает ток

$$I_d = \frac{1,35 E_{2\kappa} s - 1,17 E_{2T} \cos \beta - 3\Delta U_B}{\frac{x_{дs} + x_T}{\pi/3} + 2R_d + R_T}, \quad (7-25)$$

где $E_{2\kappa}$ — напряжение на кольцах ротора при $s = 1$;

E_{2T} — фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора;

- ΔU_B — падение напряжения в вентиле;
 R_d, x_d — активное и индуктивное сопротивления двигателя, приведенные к ротору;
 R_t, x_t — активное и индуктивное сопротивления трансформатора, приведенные к его вторичной обмотке;
 β — угол опережения зажигания инвертора.

Пусть двигатель работает в установившемся режиме с определенными скоростью и нагрузкой. При увеличении угла опережения β уменьшается напряжение инвертора и возрастает ток в промежуточной цепи. Соответственно увеличивается и ток ротора, а значит, и момент двигателя. Скорость электропривода начинает возрастать. С ростом скорости снижается скольжение и вместе с ним напряжение ротора. Это приводит к уменьшению тока и ускорению двигателя. Наступает новый установившийся режим при большем значении скорости.

Механические характеристики электропривода показаны на рис. 7-16. Меньшая жесткость характеристик по сравнению с естественной характеристикой двигателя объясняется дополнительными падениями напряжения в выпрямителе и инверторе. Минимальное скольжение, имеющее место при отсутствии нагрузки, определяется [как это следует из (7-25)] падением напряжения в вентиле:

$$s_{0min} = 3\Delta U_B / 1,35E_{2K}. \quad (7-26)$$

Максимальное скольжение без учета нагрузки зависит от вторичного напряжения трансформатора:

$$s_{0max} \approx 1,17E_{2T} / 1,35E_{2K}. \quad (7-27)$$

С ростом s_{0max} , т. е. с увеличением диапазона регулирования скорости, растет напряжение в роторной цепи, а вместе с ним и установленная мощность трансформатора и вентиляей. При этом снижаются КПД и $\cos \phi$ электропривода. Поэтому наибольший диапазон регулирования скорости в данной каскадной схеме не превышает 2:1.

При больших диапазонах регулирования ($D > 2$) и высоких требованиях к жесткости механических характеристик электропривода перспективна система тиристорный преобразователь частоты — асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (ТПЧ — АД). Отсутствие необходимости в электрическом торможении и реверсе привода механизмов центробежного типа упрощает структуру ТПЧ и позволяет выполнить его на базе автономного инвертора напряжения АИН и управляемого выпрямителя УВ (рис. 7-17, а). Жесткость механических характеристик привода в такой системе в диапазоне регулирования

скорости 2—3 и при законе управления $u/f \approx \text{const}$ (рис. 7-17, б) обеспечивает достаточную стабильность регулируемой скорости. В связи с этим в системе электропривода не требуются какие-либо обратные связи, что упрощает ее структуру. К достоинствам системы ТПЧ — АД следует отнести также отсутствие дополнительных потерь при регулировании скорости.

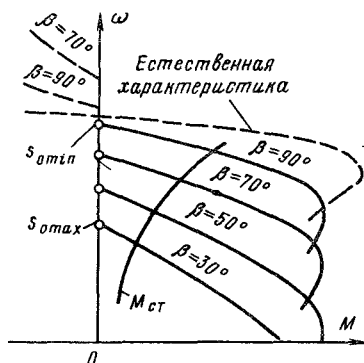


Рис. 7-16. Механические характеристики асинхронно-вентильного каскада с вентиляторной нагрузкой на валу.

Познакомившись с кратким обзором применяемых систем электропривода механизмов рассматриваемой группы, перейдем к вопросу определения номинальной мощности регулируемого асинхронного двигателя механизмов центробежного типа. За критерий выбора двигателя примем условие:

$$\Delta P_{2\text{дв,мах}} \leq \Delta P_{2\text{ном}}, \quad (7-28)$$

где $\Delta P_{2\text{дв,мах}}$ — максимальные потери мощности в обмотке ротора в заданном диапазоне регулирования скорости;

$\Delta P_{2\text{ном}}$ — номинальные потери мощности в обмотке ротора.

Условие (7-28) не учитывает изменение теплоотдачи и соотношения потерь в статорной и роторной обмотках двигателя при изменении скорости. Данные факторы могут быть учтены в повсрочном расчете предварительно выбранного двигателя. Определим зависимость потерь скольжения асинхронного двигателя ΔP_{2s} от скорости для механизма центробежного типа. Для общего случая, когда $H_{\text{ст}} \neq 0$, воспользуемся аналитической аппроксимацией (7-13) зависимости момента сопротивления от ω . За максимальные значения момента и скорости примем их значения на естественной характеристике двигателя: $M_{\text{ст,мах}} = M_{\text{ст,е}}$; $\omega_{\text{мах}} = \omega_{\text{с,е}}$. Тогда потери скольжения опреде-

лятся выражением

$$\Delta P_{2s} = M_{ст} (\omega_0 - \omega) = M_{ст,е} \left(\frac{\omega}{\omega_{с,е}} \right)^k (\omega_0 - \omega). \quad (7-29)$$

Найдем максимум потерь при условии, что скорость идеального холостого хода двигателя ω_0 не изменяется в процессе регулирования. Дифференцирование (7-29) по ω дает:

$$\frac{d\Delta P_{2s}}{d\omega} = \frac{M_{ст,е}}{\omega_{с,е}^k} [k\omega_0\omega^{k-1} - (k-1)\omega^k].$$

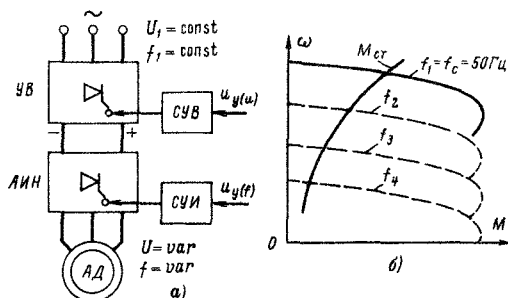


Рис. 7-17. Схема (а) и механические характеристики (б) системы ТПЧ – АД.

Из условия $d\Delta P_{2s}/d\omega = 0$ определим скорость ω_m и скольжение S_m , соответствующие максимальным потерям, и эти потери $\Delta P_{2s,max}$:

$$\omega_m = \frac{k}{k+1} \omega_0; \quad s_m = \frac{1}{k+1}; \quad (7-30)$$

$$\Delta P_{2s,max} = \frac{k^k}{(k+1)^{k+1}} \left(\frac{\omega_0}{\omega_{с,е}} \right)^k M_{ст,е} \omega_0. \quad (7-31)$$

Для механизмов, работающих без статического напора ($H_{ст} = 0$), $k = 2$ и соответственно

$$\omega_m = \frac{2}{3} \omega_0; \quad s_m = \frac{1}{3}; \quad (7-32)$$

$$\Delta P_{2s,max} = \frac{4}{27} \left(\frac{\omega_0}{\omega_{с,е}} \right)^2 M_{ст,е} \omega_0. \quad (7-33)$$

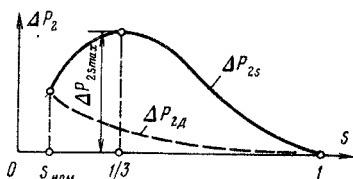
График изменения ΔP_{2s} от s показан на рис. 7-18. Потери скольжения одновременно являются и потерями в роторе для двигателей с короткозамкнутым ротором при $\omega_0 = \text{const}$, т. е.

для способов регулирования изменением напряжения U_c или параметров R_1 и x_1 статорной цепи. Для реостатного и частотного способов регулирования потери в обмотке ротора определим по формуле

$$\Delta P_{2д} = 3I_2^2 R_2 = \Delta P_{2е} (I_2/I_{2е})^2, \quad (7-34)$$

где $I_{2е}$ и $\Delta P_{2е}$ — значения тока и потерь в роторе, соответствующие естественной характеристике двигателя.

Рис. 7-18. Зависимость потерь в роторной цепи от скольжения для асинхронного двигателя с вентиляторным моментом на валу.



Принимая, что момент пропорционален току, получаем:

$$\Delta P_{2д} = \Delta P_{2е} (M/M_{ст,е})^2 = \Delta P_{2е} (\omega/\omega_{с,е})^{2k}. \quad (7-35)$$

Из (7-35) следует, что при снижении скорости (увеличении скольжения) потери в обмотке ротора резко уменьшаются от своего максимального значения $\Delta P_{2max} = \Delta P_{2е}$ на естественной характеристике до нуля при $\omega = 0$ (штриховая линия на рис. 7-18). Таким образом, регулирование скорости при реостатном и частотном способах не вызывает увеличения потерь в двигателе. Условие (7-28) выполняется, если максимальный момент сопротивления равен номинальному моменту двигателя. Следовательно, номинальная мощность двигателя как для нерегулируемого, так и регулируемого электропривода одна и та же:

$$P_{ном} \geq P_{с,е}; \quad M_{ном} \geq M_{ст,е}. \quad (7-36)$$

Для способов регулирования скорости изменением U_c , R_1 , x_1 при выборе двигателя в соответствии с (7-28) и (7-31) должно выполняться условие:

$$\frac{\Delta P_{2с, max}}{\Delta P_{2ном}} = \varphi_k \left(\frac{\omega_0}{\omega_{с,е}} \right)^k \frac{M_{ст,е}}{M_{ном}} \frac{1}{s_{ном}} \leq 1, \quad (7-37)$$

где $\varphi_k = k^k / (k+1)^{k+1}$

При этом имеется в виду, что в диапазон регулирования скорости входит ω_m . Принимая приближенно $\omega_0 \approx \omega_{с,е}$, получаем условия для оценки необходимого завышения номинального момента двигателя $M_{ном}$ над максимальным моментом механизма $M_{ст,е}$:

$$\lambda_3 = \frac{M_{ном}}{M_{ст,е}} > \varphi_k \frac{1}{s_{ном}}. \quad (7-38)$$

Для механизмов с $H_{\text{ст}} = 0$

$$\lambda_3 = \frac{M_{\text{ном}}}{M_{\text{ст,е}}} > \frac{4}{27} \frac{1}{s_{\text{ном}}}. \quad (7-39)$$

Выражение (7-38) показывает, что коэффициент запаса λ_3 по номинальному моменту, а значит, и мощности для регулируемого указанными способами двигателя зависит как от вида характеристики механизма (показатель параболы k), так и от номинального скольжения двигателя.

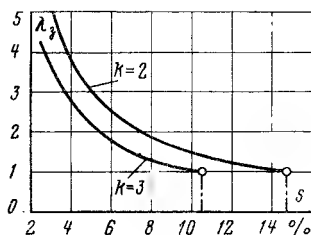


Рис. 7-19. Зависимость коэффициента завышения номинального момента от номинального скольжения двигателя.

На рис. 7-19 построены граничные зависимости λ_3 от $s_{\text{ном}}$ для $k=2$ и $k=3$, соответствующие правой части (7-38). Например, для $s_{\text{ном}} < 0,07$ $\lambda_3 > 1,5$ при $k=3$ и $\lambda_3 > 2$ при $k=2$. Завышение установленной мощности отсутствует ($\lambda_3 = 1$) при $s_{\text{ном}} = 0,105$ для $k=3$ и при $s_{\text{ном}} = 0,148$ для $k=2$. Чем больше мощность двигателя, тем меньше его номинальное скольжение, тем большее завышение по мощности требуется для регулируемого электропривода. Поэтому способы регулирования скорости двигателя путем изменения напряжения или параметров его статорной цепи оказываются практически приемлемыми лишь для электроприводов малой мощности. При этом двигатели целесообразно выбирать из серии с повышенным скольжением или применять специальные двигатели с массивным ротором.

Пример 7-1. Требуется выбрать асинхронный двигатель и определить его номинальную мощность для центробежного водяного насоса, имеющего данные: $Q_{\text{ном}} = 24 \text{ м}^3/\text{ч}$; $H_{\text{ном}} = 15 \text{ м}$; $\eta_{\text{ном}} = 0,5$; $H_{\text{ст}} = 0$; $n_{\text{с,ном}} = 1450 \text{ об/мин}$. Подача насоса должна регулироваться в пределах от $Q_{\text{ном}}$ до $0,5 Q_{\text{ном}}$. Регулирование осуществляется электрическим способом путем изменения напряжения на статоре двигателя.

В соответствии с (7-8) рассчитывается номинальная мощность насоса

$$P_{\text{с,ном}} = \frac{\gamma Q_{\text{ном}} H_{\text{ном}} g}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{10^3 \cdot 24 \cdot 15 \cdot 9,81}{0,5 \cdot 3600} \cdot 10^{-3} = 1,96 \text{ кВт}.$$

Тип	$P_{\text{ном}}, \text{ кВт}$	$s_{\text{ном}}$	λ_3	$\lambda_3 P_{\text{с, ном}}, \text{ кВт}$
АОС2-51-4	2,3	0,07	2,1	4,1
АОС2-52-4	3,5	0,065	2,3	4,5
АОС2-62-4	7,7	0,093	1,6	3,1

Применительно к заданному способу регулирования скорости и учитывая номинальную скорость насоса, выбираем асинхронный короткозамкнутый шестиполосный двигатель серии АОС (с повышенным скольжением). Согласно (7-22) находим требуемый диапазон регулирования скорости

$$D = \omega_{\text{с, ном}} / \omega_{\text{min}} = Q_{\text{ном}} / Q_{\text{min}} = 2.$$

Так как диапазон изменения скорости включает в себя скорость, соответствующую максимуму потерь в роторе, номинальную мощность двигателя следует определять в соответствии с условием (7-37) или (7-39) при $H_{\text{ст}} = 0$. Из каталога выбираем несколько двигателей, мощность которых превышает номинальную мощность насоса, и согласно (7-39) рассчитываем коэффициенты запаса. Результаты расчета приведены в таблице.

Выбирается тот двигатель, для которого выполняется условие $\lambda_3 P_{\text{с, ном}} \leq P_{\text{ном}}$. Для нашего случая это двигатель типа АОС2-62-4.

7.4. АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ ЦЕНТРОБЕЖНОГО И ПОРШНЕВОГО ТИПОВ

Установки данного типа могут относиться к основному рабочему оборудованию, если они непосредственно участвуют в технологическом процессе производства. Например, насосы выпарных аппаратов в производстве кислот, щелочей должны изменять подачу в строгом соответствии с протеканием данного технологического процесса. В этом случае задача автоматизации заключается в обеспечении электроприводом насосов автоматического регулирования скорости в зависимости от состояния контролируемых факторов процесса: температуры, уровня, концентрации перекачиваемых сред и т. д. Аналогичная задача возникает и для таких установок, как воздухоподушки, газодушки, дымососы, когда по условиям производственного процесса требуется автоматическое регулирование их подачи. Такая автоматизация означает обеспечение автоматической работы регулируемого электропривода в производственном комплексе и связана с проблемами разработки АСУ ТП на базе данных механизмов и их приводов.

Установки центробежного и поршневого типов могут относиться и к вспомогательному оборудованию, когда они обслу-

живают ряд производственных процессов, но непосредственного участия в них не принимают. К подобным установкам относятся насосные и компрессорные станции в системах водоснабжения и снабжения сжатым воздухом промышленных предприятий, шахтные вентиляторы и дренажные насосы, насосные станции в системах водоснабжения населенных пунктов

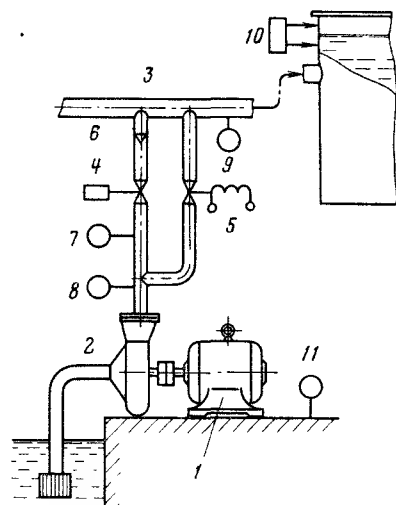


Рис. 7-20. Расположение элементов автоматизации насосной установки.

1 — асинхронный двигатель; 2 — насос; 3 — магистраль; 4 — электропривод задвижки; 5 — электромагнитный привод задвижки; 6 — обратный клапан; 7 — реле давления; 8 — реле заливки; 9 — расходомер; 10 — реле уровня; 11 — реле заливки (аварийное).

и т. п. В задачу автоматизации таких установок входит прежде всего обеспечение их бесперебойной работы, упрощение управления ими и высвобождение обслуживающего персонала от круглосуточных дежурств.

В системах снабжения потребителей водой и сжатым воздухом автоматизация должна обеспечить дистанционное и автоматическое включение и отключение отдельных насосов и компрессоров в соответствии с изменением расхода воды или воздуха. На автоматизацию возлагаются также защитные функции при аварийных ситуациях: неисправном оборудовании, переполнении водосборников, затоплении помещений и т. п. Для решения указанных задач применяются различные средства автоматики, среди которых имеется ряд устройств, специфичных для данной группы механизмов.

На рис. 7-20 показано расположение элементов автоматизации насосной установки. Пуск разрешается только заполненным водой насосом, что контролируется с помощью реле заливки. Такое же реле может использоваться и как аварийное при затоплении помещения насосной из-за течи насоса или его по-

дающей магистрали. Оно дает аварийный сигнал в диспетчерскую и отключает насос. Устройство реле заливки типа РЗН-67 показано на рис. 7-21. Вода, поступающая в патрубок реле, отжимает диск со штоком вверх до упора в резиновую уплотнительную прокладку и контакт реле замыкается. Реле давления, установленное на выходном патрубке насоса перед задвижкой,

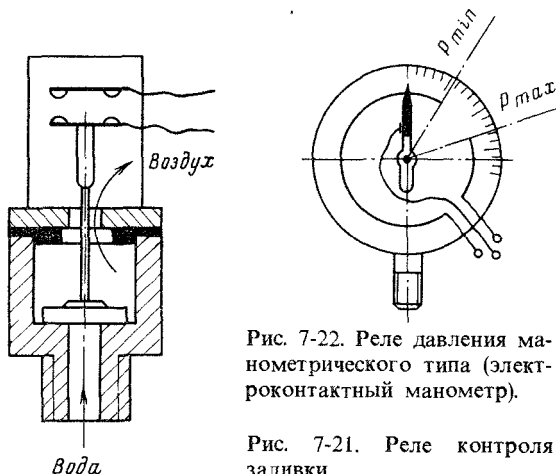


Рис. 7-22. Реле давления манометрического типа (электрореле манометр).

Рис. 7-21. Реле контроля заливки.

контролирует пуск насоса. Если после пуска насос развивает необходимое давление, то реле дает сигнал на открывание задвижки. В противном случае задвижка остается закрытой, а двигатель отключается.

Устройство реле давления манометрического типа показано на рис. 7-22. Прибор имеет два регулируемых контакта, один на минимальную, а другой на максимальную уставку давления. Перемещения контактной системы по шкале позволяют настроить реле на требуемые значения минимального и максимального давлений. Уровень воды в водосборочном резервуаре контролируется с помощью реле уровня. Превышение максимального уровня дает сигнал на отключение насосной установки, а уменьшение уровня ниже минимальной отметки вызывает включение насоса.

Устройство поплавкового реле уровня типа РП-40 показано на рис. 7-23. С поплавком механически связана траверса с ртутными контактами. При перемещении поплавка вверх или вниз совместно с контролируемым уровнем траверса реле поворачивается в ту или другую сторону. При этом в первую очередь замыкается контакт 1 или 1', а при дальнейшем изменении

уровня — 2 или 2'. Автоматическое включение и отключение насоса может выполняться и в зависимости от суммарной производительности, контролируемой в общей магистрали с помощью расходомера. При питании общей магистрали насосной станцией с несколькими параллельно работающими насосами появляется возможность ступенчатого регулирования подачи

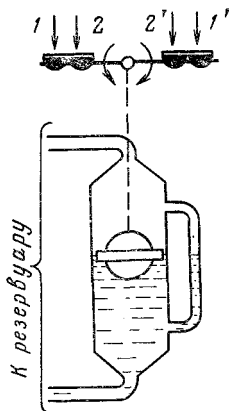


Рис. 7-23. Реле уровня поплавкового типа.

воды. Снижение расхода воды в системе фиксируется расходомером, выполненным в виде датчика подачи, который подаст сигнал на отключение одного или более насосов в зависимости от уровня снижения расхода. Использование датчика непрерывного действия дает возможность осуществить плавное регулирование подачи с помощью задвижки или изменения скорости двигателя насоса.

Рассмотрим типовой узел автоматизации пуска в схемах управления электроприводом насосов. Принципиальная схема узла без силовых цепей изображена на рис. 7-24, а, б. Схема состоит из двух частей, одна из которых относится к двигателю насоса (рис. 7-24, а), а вторая — к двигателю задвижки (рис. 7-24, б). Включение и отключение насоса происходит в данной схеме в зависимости от состояния уровня воды в водосборнике, контролируемого с помощью реле *ПР*. При снижении уровня замыкается контакт *ПР* и включается реле автоматического управления *РУ*. При этом включается линейный контактор *Л*, подающий питание на двигатель насоса, при условии, что насос залит водой (контакт водяного реле заливки *ВР* должен быть замкнут). Одновременно реле времени *РВ1*, получив питание, отсчитывает выдержку времени, несколько превышающую время нормального пуска насоса. В конце процесса пуска насос должен развивать необходимое давление, при котором срабатывает реле давления *РД* и разрывает цепь реле аварийного отключения *РА1*. Этим блокируется отключение контактора *Л* по истечении выдержки времени реле *РВ1*. Вторым контактом реле давления включает цепь контактора открывания задвижки *КО*, который пускает двигатель задвижки. При полностью открытой задвижке конечный выключатель *КВО* отключает цепь *КО*. Насос при этом развивает полную подачу.

Схема узла пуска выполняет также защитные функции. Для

данных механизмов важной является максимальная защита. Для насосов попадание в рабочее колесо вместе с жидкой средой твердых включений может привести к повреждению лопаток колеса и недопустимым перегрузкам двигателя. Для задвижек при заклинивании механизма или повреждении конечных выключателей привод работает на упор, поэтому необходимо

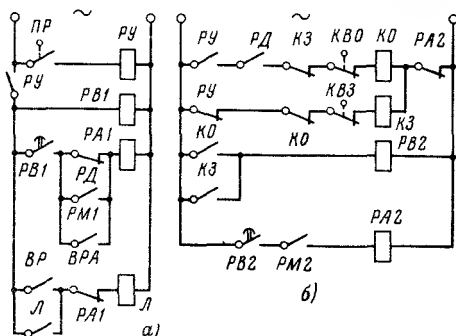


Рис. 7-24. Схема узла автоматического пуска насоса (а) и открывания задвижки (б).

надежное отключение приводов в указанных аварийных ситуациях. Если к концу пуска токи двигателей насоса и задвижки превосходят допустимые значения, то контакты максимальных реле $PM1$ и $PM2$ остаются замкнутыми и по истечении выдержек времени $PB1$ и $PB2$ двигатели отключаются от сети. При затоплении помещения насосной двигатель насоса также отключается с помощью аварийного водяного реле $ВРА$.

Системы водоснабжения могут включать в свой состав большое число насосных установок, удаленных друг от друга на значительные расстояния. Автоматизация этих установок требует централизованного контроля за их работой и дистанционного управления. Эта задача решается с помощью телеуправления из диспетчерского пункта.

На рис. 7-25 приведена схема узла двухпозиционного телеуправления насосными установками из диспетчерского пункта. Левая часть схемы находится в диспетчерской, а правая — на насосной станции. Обе части соединяются проводом связи. В качестве обратного провода используется земля. В диспетчерской расположены сигнальные реле телефонного типа с небольшим током срабатывания (5–6 мА) на включение установки PCB и на отключение PCO . На пульте самой установки смонтированы реле управления на включение PUB и от-

ключение РУО. Эти реле имеют бо́льший ток срабатывания (25–30 мА) и управляют линейным контактором Л двигателя установки.

В режиме управления переключатели ПУ1 и ПУ2 соединяют цепи сигнальных и управляющих реле. При отключенной установке ток протекает через РСВ и РУВ. Этот ток оказывается достаточным для срабатывания РСВ, но слишком малым для

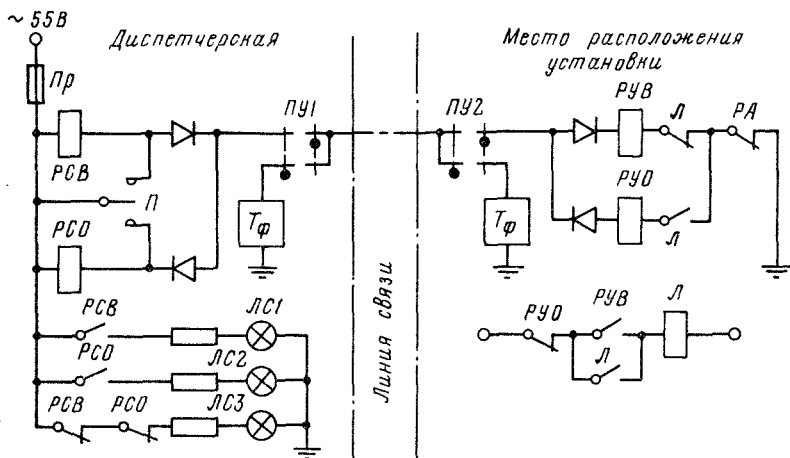


Рис. 7-25. Схема узла двухпозиционного телеуправления из диспетчерского пункта.

втягивания РУВ. Реле РСВ включает сигнальную зеленую лампу ЛС1, что означает отключенное состояние установки. Реле РСО при этом обесточено из-за двух встречно включенных диодов в его цепи. Для осуществления пуска ключом П шунтируется обмотка РСВ. Ток в цепи возрастает, и срабатывает реле РУВ, которое включает линейный контактор двигателя. Контакт РУВ блокируется контактом Л и контактор остается включенным, хотя реле РУВ отключается. После шунтирования катушки РСВ это реле отключается и лампа ЛС1 гаснет.

Возвращение ключа П в среднее положение сохраняет обесточенное состояние РСВ из-за встречно включенных диодов Д1 и Д2. Срабатывание Л замыкает цепь катушки РУО и включается реле РСО. Загорается сигнальная красная лампа ЛС2, означающая включенное состояние двигателя установки. Для отключения двигателя ключом П шунтируется обмотка РСО, что приводит к срабатыванию РУО и отключению Л. Двигатель отключается от сети, лампа ЛС2 гаснет, а ЛС1 загорается,

и схема приходит в исходное положение. При аварийном отключении установки контакт реле *РА* отключает всю цепь и оба реле *РСВ* и *РСО* отключаются. Загорается желтая лампа аварийной сигнализации *ЛСЗ*.

Схема обеспечивает телефонную связь насосной станции с диспетчерской с односторонним вызовом из насосной. Для вызова диспетчерской переключатель *ПУЗ* попеременно пере-

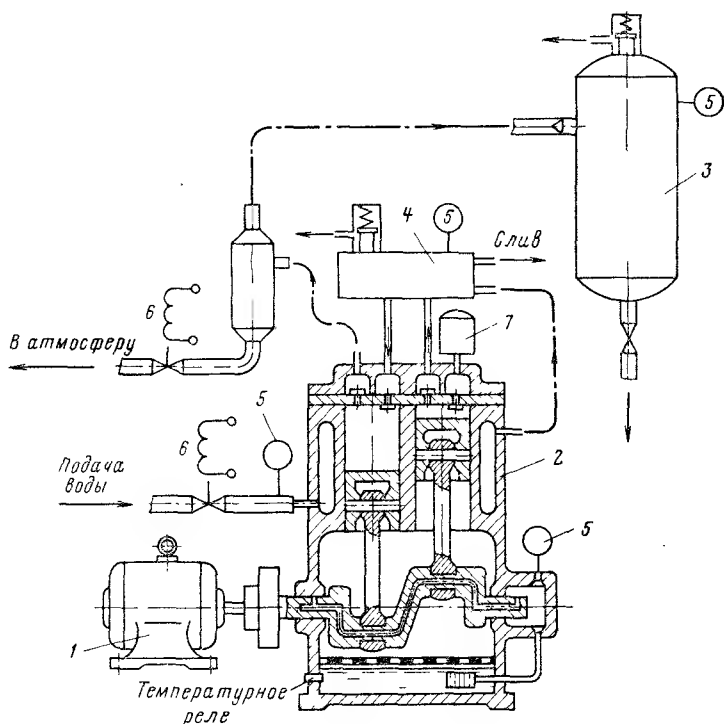


Рис. 7-26. Расположение элементов автоматизации компрессорной установки.

1 — асинхронный двигатель; 2 — компрессор; 3 — ресивер; 4 — холодильник; 5 — реле давления; 6 — электрический клапан; 7 — воздушный фильтр.

ключается из одного положения в другое. При этом в диспетчерской мигает желтая лампа и дежурный, замечая это, переводит *ПУЗ* в положение телефонной связи.

Рассмотрим некоторые элементы автоматизации работы механизмов поршневого типа на примере компрессорной установки (рис. 7-26). Автоматическое включение и отключение

компрессоров осуществляется в зависимости от давления в воздухохоборнике — ресивере с помощью реле давления манометрического типа. Это пневматическое реле по своему устройству практически не отличается от аналогичного гидравлического реле (см. рис. 7-22). Реле давления выполняют также защитные функции, отключая двигатель компрессора, если выходит за установленные пределы давление сжатого воздуха в холодильнике, давление охлаждающей воды, давление масла коренных подшипников. Автоматизация предусматривает также отключение выхода компрессора от ресивера на время пуска с целью облегчения процесса разгона двигателя.

7.5. ПРИМЕРЫ СХЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМОВ ЦЕНТРОБЕЖНОГО И ПОРШНЕВОГО ТИПОВ

На рис. 7-27, а показана технологическая схема насосов шахтной водоотливной установки, предназначенной для откачивания грунтовых вод из пяточных ям шахтных стволов и заглубленных забоев. В установку входят два насоса 1Н и 2Н с заливными бачками 1Б и 2Б, обеспечивающими постоянную заливку насосов. Насосы приводятся во вращение асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором 1Д и 2Д, которые для большей надежности подключены к разным секциям шин понизительной подстанции (рис. 7-27, б). Если уровень воды в яме ниже рабочего уровня, то насосы не откачивают воду. При превышении водой рабочего уровня вводится в работу один из насосов. Когда уровень воды становится выше аварийного, к работе подключается второй, резервный насос.

Схема электропривода позволяет осуществлять различное управление двигателями насосов: автоматическое в зависимости от уровня воды в яме, дистанционное (из диспетчерской), местное с помощью кнопок управления, расположенных непосредственно у насосов. Выбор автоматического АУ и дистанционного ДУ управлений осуществляется универсальными переключателями 1УП и 2УП. Переключатели 1ПП и 2ПП позволяют выбрать для каждого двигателя способ управления: дистанционный ДУ и местный с помощью кнопок 1КУ и 2КУ. Переключатель ПО позволяет с целью равномерного изнашивания оборудования поочередно использовать в качестве рабочего двигатель 1Д и 2Д.

Автоматическое включение двигателя рабочего насоса осуществляется с помощью поплавкового реле 1ПР, контролирующего рабочий уровень воды. Двигатель резервного насоса включается поплавковым реле 2ПР, контролирующим ава-

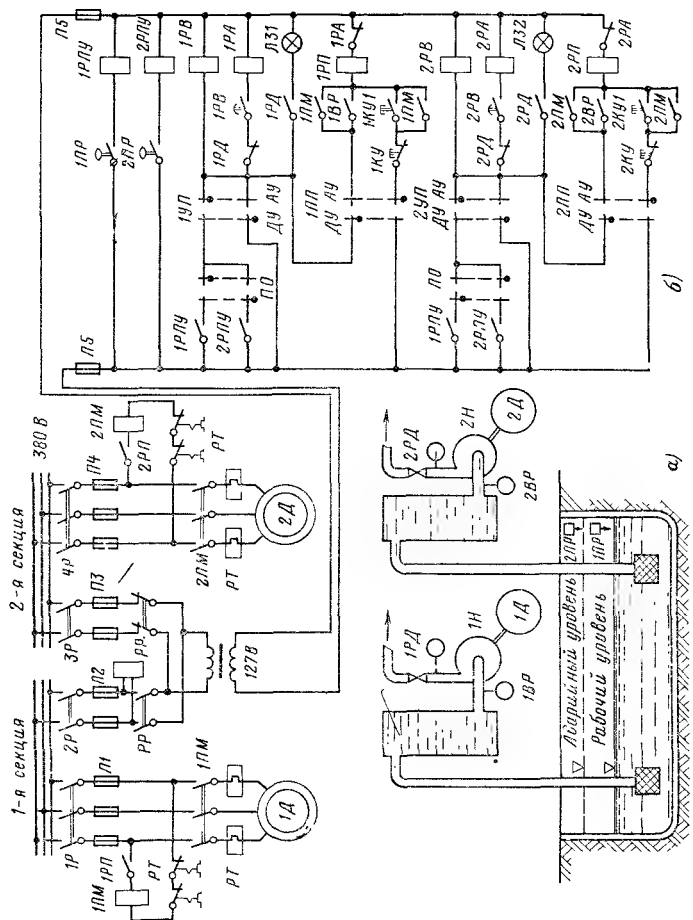
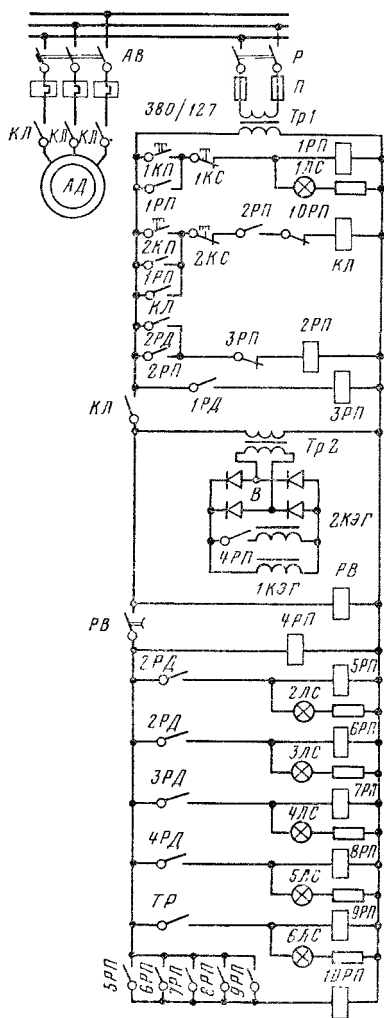


Рис. 7-27. Водотливная установка (а) и схема электропривода (б).

рийный уровень. Если через время выдержки реле *1РВ* или *2РВ* насос не создаст необходимый напор, то двигатель отключается от сети. Запуск двигателя не произойдет и в том случае, если насос не полностью залит водой (недостаточный уровень воды в заливном бачке и контакты реле контроля заливки *1ВР* или *2ВР* разомкнуты).

На рис. 7-28 приведена схема автоматизированного электро-



привода поршневого компрессора. Асинхронный двигатель компрессора может пускаться с места установки компрессора с помощью кнопки *2КП*, а также из диспетчерской с помощью кнопки *1КП*. Разрешение на пуск дается с помощью реле *2РП*, если давление в воздухоборнике (ресивере) меньше нормы. При этом замыкающий контакт реле давления *1РД* в цепи реле *2РП* замкнут, катушка реле *2РП* обтекается током и замыкающий контакт *2РП* в цепи линейного контактора *КЛ* замкнут. После включения контактора *КЛ* получает питание катушка электрогидравлического клапана *1КЭГ*, который подает охлаждающую воду в компрессор. Через выдержку времени реле *РВ* получает питание реле *4РП*, которое включает клапан *2КЭГ*. Этот клапан закрывает выход воздуха из компрессора в атмосферу (см. рис. 7-26). Выдержка времени реле *РВ* несколько превышает

Рис. 7-28. Схема электропривода поршневого компрессора.

ет время пуска двигателя, благодаря чему клапан 2КЭГ открыт, и пуск двигателя облегчается.

Если расход воздуха невелик и давление в ресивере превосходит норму, то замыкается контакт 1РД в цепи реле 3РП. Последнее своим размыкающим контактом отключает реле 2РП. Цепь контактора КЛ теряет питание, и двигатель отключается от сети. Когда потребление воздуха возрастет и давление

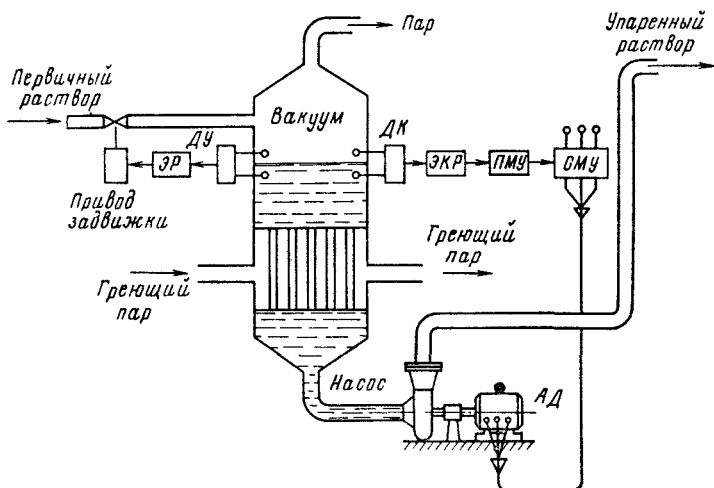


Рис. 7-29. Схема установки по выпарке щелоков

в ресивере снизится по сравнению с нормой, реле давления замкнет свой верхний контакт 1РД и включит реле 2РП. Капсушка контактора КЛ вновь получит питание, и компрессор включится в работу аналогично описанному выше.

Схема обеспечивает автоматическое отключение двигателя, если выходят за пределы нормы давление воздуха в холодильнике, давление охлаждающей воды и масла, подводимого к коренным подшипникам, а также температура масла (см. рис. 7-26). Указанные параметры контролируются с помощью реле давления 2РД, 3РД, 4РД и температурного реле ТР. Сигналы на отключение двигателя подаются через реле 5РП — 9РП на реле 10РП, которое производит аварийное отключение контактора КЛ.

На рис. 7-29 показана схема автоматизированной установки выпарки щелоков. В данном случае насос включен в основной технологический процесс производства щелоков. Щелочной

раствор выпаривается в теплообменном аппарате, где концентрация щелоков повышается до требуемого уровня. Аппарат работает под вакуумом для понижения температуры кипения раствора, а значит, и уменьшения теплоты, подаваемой в аппарат греющим паром. Отбор щелоков из аппарата и подачи их на следующую ступень выпарки или в сборный резервуар производится непрерывно с помощью насоса. Требуемый уровень концентрации щелоков поддерживается постоянной системой регулирования.

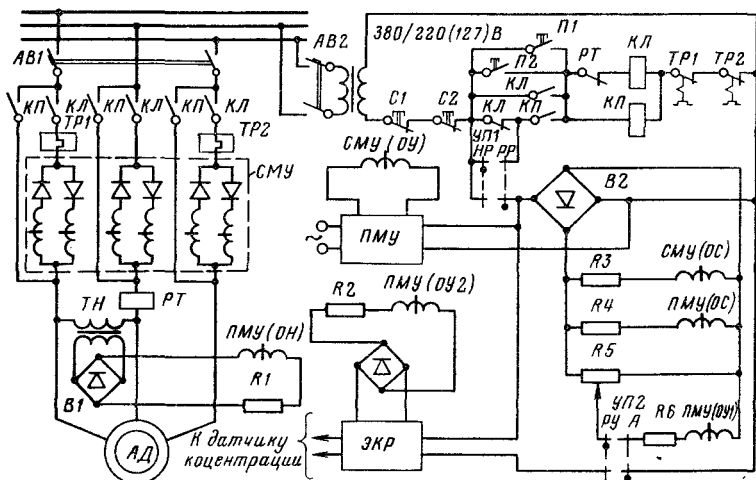


Рис. 7-30. Схема электропривода насоса выпарного аппарата.

Система включает в себя датчики уровня ДУ и концентрации ДК щелоков в аппарате, электронные регуляторы ЭР и ЭКР, привод задвижки на впускном патрубке аппарата и электропривод насоса на выпускном патрубке. Концентрация щелоков измеряется мостовым температурным датчиком, поскольку температура насыщающих паров над жидкостью зависит от ее плотности. Требуемый уровень концентрации задается потенциометром в электронном регуляторе ЭКР. При повышении концентрации по сравнению с заданным уровнем напряжение на выходе ЭКР и ток управления промежуточного магнитного усилителя ПМУ возрастают. Скорость двигателя насоса повышается, и подача насоса увеличивается. Это приводит к уменьшению времени выпарки жидкости, проходящей через аппарат. Следовательно, концентрация начинает снижаться.

С уменьшением уровня жидкости в аппарате из-за возрастания подачи насоса датчик уровня ДУ через регулятор ЭР дает сигнал на большее открытие входной задвижки. Дополнительный приток раствора восстанавливает уровень в аппарате и способствует быстрейшему восстановлению заданного уровня концентрации.

На рис. 7-30 приведена схема автоматизированного электропривода насоса мощностью до 7 — 10 кВт. Насос приводится в движение асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Скорость двигателя регулируется с помощью трехфазного силового магнитного усилителя СМУ, включенного в статорную цепь. Большой статический напор установки позволяет обеспечить требуемый диапазон регулирования подачи насоса небольшим изменением скорости двигателя. Для получения достаточно жестких механических характеристик электропривода применяется отрицательная связь по напряжению ОН дополнительно к внутренней положительной связи по току, создаваемой рабочими обмотками СМУ. Применение ПМУ позволяет усилить выходную мощность ЭКР в необходимой для управления СМУ степени, а также уменьшить размеры трансформатора напряжения ТН и повысить жесткость механических характеристик. Для повышения момента двигателя в процессе пуска силовой магнитный усилитель шунтируется контактором КП. Схема управления двигателем позволяет осуществить запуск и остановку насоса с главного пульта и с места его установки (кнопки П1, П2, С1, С2). Переключатель УП1 позволяет установить нерегулируемый режим работы насоса НР, когда СМУ остается зашунтированным контактором КП, и насос развивает максимальную производительность, а также регулируемый режим РР, когда КП в конце пуска отключается токовым реле РТ и в цепь статора вводятся рабочие обмотки СМУ. С помощью переключателя УП2 можно выбрать один из регулируемых режимов работы насоса: автоматический А или ручное управление РУ.

ПРИМЕРЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА И АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

8-1. РОТОРНЫЙ ЭКСКАВАТОР

Технологическим комплексом принято называть совокупность различных производственных машин и механизмов, объединенных общим технологическим процессом. Одним из характерных примеров объединения различных машин в единый технологический комплекс является система разработки полезных ископаемых открытым способом. В технологический комплекс карьера (рис. 8-1) входят: роторный экскаватор, работающий в забое; конвейерная линия; главный загрузочный бункер; железнодорожный транспорт. Роторные экскаваторы находят все большее применение на открытых разработках угольных и рудных месторождений и отличаются высокой производительностью, достигающей для крупных машин 5000 т/ч. Рабочее движение роторного экскаватора и транспортировку выработанной породы или полезного ископаемого обеспечивают следующие механизмы: многоковшовое роторное колесо, осуществляющее выработку грунта; механизм подъема стрелы с роторным колесом; поворотное устройство, позволяющее в процессе выработки грунта поворачивать стрелу с роторным колесом; механизм хода, перемещающий экскаватор вдоль забоя; транспортирующее устройство — система ленточных конвейеров, доставляющих породу от роторного колеса к главному конвейеру или на отвал. Механизмы подъема, поворота и хода относятся к механизмам циклического действия, а роторное колесо и транспортирующее устройство — к механизмам непрерывного транспорта.

Общий технологический цикл комплекса состоит из следующих операций: загрузки железнодорожного состава, его отправки и подачи нового порожнего состава. Общий цикл включает в себя внутренние циклы отдельных механизмов комплекса: поворота и хода экскаватора, открывания и закрывания бункера, дозированного перемещения состава в процессе его загрузки. Циклограммы механизмов циклического действия данного комплекса приведены на рис. 8-2, а, б. Механизмы поворота и хода экскаватора работают поочередно. После каждой отработки заданного угла в забое α включается привод хода, который перемещает роторное колесо на заданную подачу S_x (рис. 8-2, а). В результате обеспечивается непрерывная выработка породы в забое (см. штриховые линии на рис. 8-1).

Управление работой экскаватора осуществляется с пульта машиниста. Наличие машиниста позволяет упростить общую задачу комплексной автоматизации, возложив часть функций по оперативным включениям и отключениям приводов на машиниста экскаватора. Порода от роторного колеса через систему ленточных конвейеров подается в загрузочный бункер. На интервале времени смены вагона под бункером он должен быть закрыт. Закрывание и открывание бункера

выполняется оператором с пульта управления, который расположен в непосредственной близости от места загрузки вагона (см. рис. 8-1).

Закрытому состоянию бункера соответствует нулевое значение управляющего напряжения $u_{3,6}$, показанное на рис. 8-2, б. На этом интервале времени состав перемещается на расстояние S_c , равное длине одного вагона. Емкость загрузочного бункера должна быть рассчитана на прием непрерывно поступающей породы на интервале времени смены вагона.

Большая протяженность состава затрудняет машинисту локомотива выполнять маневрирование по дозированному перемещению состава в процессе его загрузки. Поэтому такая операция возлагается на оператора, пульт которого расположен непосредственно у места загрузки вагона. Автоматизация процесса загрузки состава предусматри-

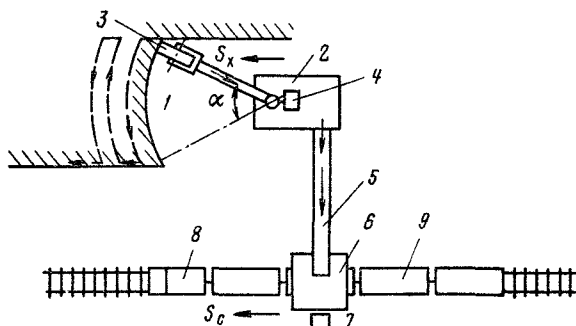


Рис. 8-1. Схема технологического комплекса с роторным экскаватором.

1 — забой; 2 — роторный экскаватор; 3 — рабочее колесо; 4 — пульт машиниста экскаватора; 5 — конвейерная линия; 6 — загрузочный бункер; 7 — пульт оператора; 8 — локомотив; 9 — железнодорожный состав.

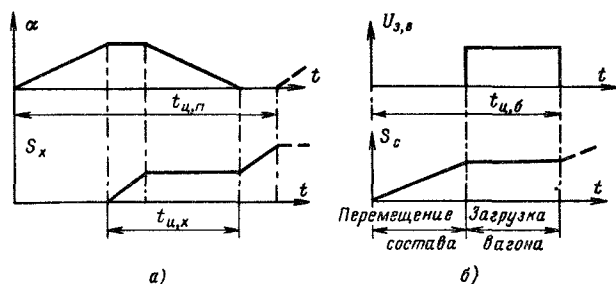


Рис. 8-2. Циклограммы работы механизмов поворота и хода экскаватора (а), а также загрузочного бункера и состава (б).

вает переключение управления локомотивом на пульт оператора. При этом машинист локомотива не участвует в операции перемещения состава в процессе его загрузки, однако при необходимости может вмешаться в управление для обеспечения безопасности маневрирования. Так как перемещения состава должны быть строго регламентированы, то для более точного выполнения данной операции оказывается целесообразным в зоне загрузки питать тяговые двигатели от автономного управляемого преобразователя.

Этот преобразователь устанавливается на посту загрузки и через дополнительный троллей подключается к двигателям электровоза (рис. 8-3). Оключение *В1* и включение *В3* переводит питание тяговых

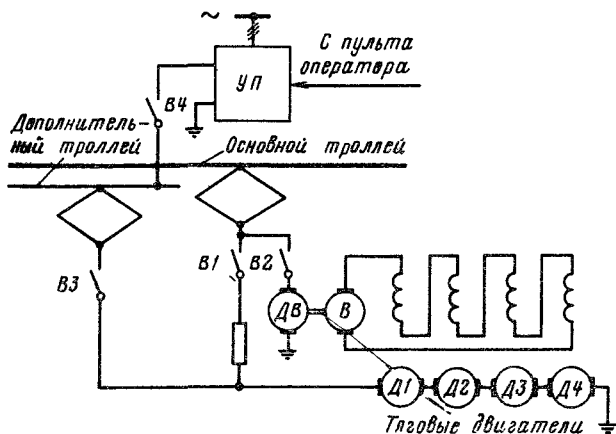


Рис. 8-3. Схема включения тяговых двигателей с автономным преобразователем на посту загрузки вагонов.

двигателей *Д1* — *Д4* с основного магистрального троллея на дополнительный, подключенный через *В4* к управляемому преобразователю *УП*. Обмотки возбуждения двигателей *Д1* — *Д4* продолжают получать питание от возбуждательного агрегата *ДВ* — *В*, который остается подключенным через *В2* к основному троллею. Применение специального управляемого преобразователя позволяет сформировать необходимую тахограмму электропривода электровоза, обеспечивающую строго дозированное перемещение состава.

Задача перемещения состава при загрузке может решаться и без специального преобразователя. В настоящее время все большее применение находят системы телеуправления с радиосвязью на УКВ. При таком способе управления передатчик на УКВ располагается на пульте оператора, а приемник с соответствующей аппаратурой управления — на локомотиве. Оператор принимает на себя на период загрузки состава функции машиниста, управляя локомотивом по радио. После загрузки всего состава управление электровозом вновь переводится на машиниста. Если отсутствует новый состав, готовый под погрузку, то

технологический цикл комплекса на этом заканчивается и оператор загрузки дает команду на остановку экскаватора.

На рис. 8-4, а, б в упрощенном виде представлены схемы электроприводов механизмов поворота и хода экскаватора, обеспечивающие автоматизацию его работы в забое. Электродвигатели Δ получают питание от управляемых преобразователей УП. Блоки У, управляющие преобразователями, включают в себя отрицательные обратные связи по току якоря и напряжению двигателей и соответствующие регуляторы и корректирующие устройства. Электроприводы построены по следящему принципу и автоматически обрабатывают заданные по технологическим условиям перемещения механизмов. Схема слежения

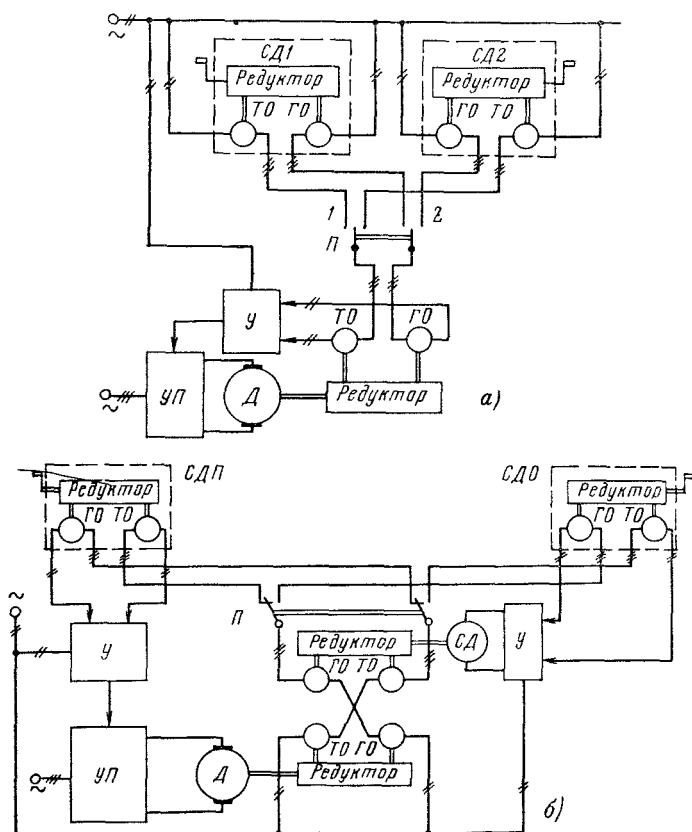


Рис. 8-4. Схема электроприводов с автоматической обработкой заданных угла поворота (а) и перемещения (б) роторного экскаватора.

имеет каналы грубого и точного отсчета, которые собраны соответственно на сельсинах *ГО* и *ТО*.

Электропривод механизма поворота осуществляет непрерывную обработку заданного угла α в забое. В одном из крайних положений механизма электропривод согласован по положению с одним из сельсинных датчиков *СД1* или *СД2* (рис. 8-4, а). При переключении переключателя *П* в другое положение электропривод отработает разность

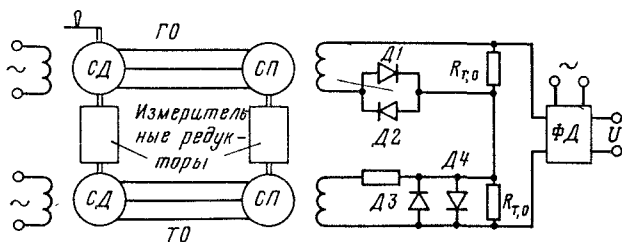


Рис. 8-5. Схема двухотсчетной системы измерения рассогласования на сельсинах.

углов между *СД1* и *СД2*, равную углу забоя α . При новом переключении *П* двигатель *Д* вновь отработает угол α , но в обратном направлении и т. д.

На рис. 8-4, б показана следящая схема электропривода хода, управляющая передвижением экскаватора на заданное расстояние (до 2—3 м) после отработки механизмом поворота угла α . В правом положении переключателя *П* серводвигатель *СД* отработывает угол, заданный сельсинным датчиком нулевого положения *СДО*. При переключении *П* налево двигателя механизма хода остаются неподвижными, если сельсинный датчик пути *СДП* находится в том же положении, что и *СДО*. При наличии угла рассогласования между *СДП* и *СДО* электропривод хода отработает этот угол. При установке *П* направо серводвигатель *СД* вновь вернет систему в нулевое положение поворотом дифференциальных сельсинов на угол рассогласования. При следующем переключении *П* налево двигателя механизма хода вновь отработают разность углов *СДП* и *СДО* в том же направлении. Таким образом, схема позволяет неограниченно долго порционно суммировать заданное перемещение экскаватора по забою.

Применение в данных схемах двухотсчетной системы измерения рассогласования позволяет отработать заданное перемещение с высокой точностью. Обычно угол поворота ротора сельсина грубого отсчета *ГО* выбирают равным измеряемому углу. Сельсин точного отсчета *ТО* поворачивается при этом на угол, в 20—30 раз превышающий угол поворота *ГО*, что соответственно в 20—30 раз повышает точность измерения угла. При больших углах рассогласования работает канал грубого отсчета. Когда рассогласование приближается к нулю, электропривод переходит в режим точного отсчета.

Для разделения сигналов грубого и точного отсчетов используются так называемые схемы селекции (рис. 8-5). При больших рассогласованиях напряжение выходной обмотки сельсина-приемника $СП (ГО)$ почти полностью выделяется на сопротивлении $R_{г.о.}$ Падение напряжения на нелинейном сопротивлении диодов $Д1$ и $Д2$ оказывается существенно меньшим. При этом, напротив, выходная цепь $СП (ТО)$ шунтирована диодными стабилитронами $Д3, Д4$ с низким уровнем напряжения. В результате на вход фазового детектора $ФД$ подается в основном сигнал от сельсина $ГО$. В области малых рассогласований выходное напряжение $ГО$ мало и в основном выделяется на диодах $Д1$ и $Д2$. При этом уровень напряжения, выделяющегося на сопротивлении $R_{г.о.}$, оказывается существенно выше, чем напряжение на $R_{г.о.}$. В результате на $ФД$ подается в основном сигнал точного отсчета.

8-2. ЗЕМЛЕСОСНЫЙ СНАРЯД

Характерным примером технологического комплекса является также землесосный снаряд (земснаряд), который находит широкое применение при добыче речного песка, для углубления речных водоемов, намывки плотин и выполняет крупномасштабные землеройные работы в подводных грунтах с одновременной транспортировкой пульпы в соответствующие заполнительные емкости или в отвал. Земснаряд представляет собой плавучую весьма специфическую установку (рис. 8-6 и объединяет в себе комплекс механизмов непрерывного и циклического действия, работа которых взаимосвязана общим технологическим процессом установки.

К механизмам непрерывного действия относятся рыхлитель 1 (спиральная фреза), разрабатывающий донный грунт, и землесос 2 , представляющий собой центробежный насос, всасывающий смесь воды

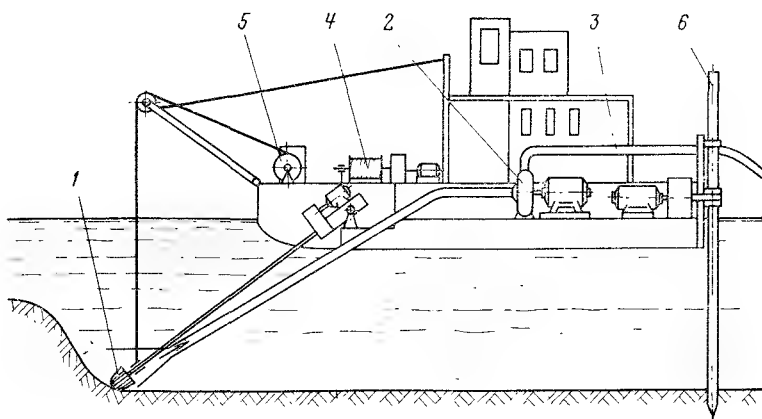


Рис. 8-6. Земснаряд и его основные механизмы.

с грунтом (пульпу) и транспортирующий ее по системе трубопроводов 3 к месту назначения.

К механизмам циклического действия относятся папильонажные лебедки 4, осуществляющие возвратно-поступательные перемещения земснаряда и выполняющие функции подачи фрезы, подъемная лебедка рыхлителя 5, задающая необходимый рабочий уровень глубины рыхлителя, и опорно-поворотные сваи 6, фиксирующие необходимое положение земснаряда относительно дна водоема и выполняющие

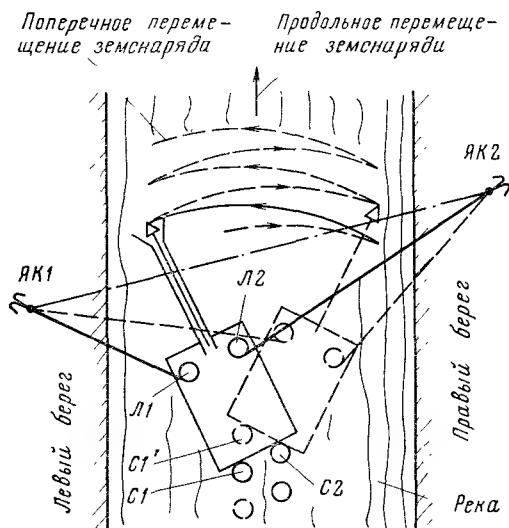


Рис. 8-7. Рабочие перемещения земснаряда в процессе разработки дна русла реки.

функции механизма хода земснаряда в процессе его работы. Соответственно работа двигателей рыхлителя и землесоса относится к длительному режиму, двигателей папильонажных лебедок — к поворотно-кратковременному, а двигателей подъемной лебедки рыхлителя и механизма подъема и опускания свай — к кратковременному режиму.

Рисунок 8-7 поясняет технологический режим работы земснаряда, выполняющего операцию углубления форватера в русле реки. В процессе работы земснаряда одна из двух свай опущена и углублена в грунте дна, а другая поднята и не касается дна. Этим обеспечивается фиксация земснаряда от продольного перемещения и возможность только его поворота относительно опущенной сваи. Пусть левая свая опущена и занимает положение $C1$. Земснаряд повернут к левому берегу. В этом крайнем положении опускается правая свая $C2$ и углубляется в дно. Далее поднимается левая свая и включается привод папильонажных лебедок. При этом правая лебедка $Л2$ наматывает трос на барабан и осуществляет поворот земснаряда относительно оси сваи $C2$

к правому берегу. Левая лебедка *Л1* стравливает трос. Для предотвращения провисания троса и погружения его в воду двигатель этой лебедки должен создавать небольшое натяжение стравливаемого троса, работая в тормозном режиме. Двигатель правой лебедки работает в двигательном режиме, преодолевая трение о воду плавучей части земснаряда, речное течение, ветровую нагрузку и тормозной момент левой лебедки. В крайнем правом положении рыхлителя привод лебедок отключается и поворот земснаряда заканчивается. Левая свая опускается и занимает новое положение *С1'*. Правая свая поднимается, включается вновь привод папильонажных лебедок и отрабатывается поворот земснаряда влево уже относительно оси левой сваи *С1'*. Следовательно, за один цикл работы папильонажных лебедок земснаряд перемещается по направлению выработки грунта вдоль русла на расстояние от *С1* до *С1'*.

Таким образом, непрерывный технологический процесс выработки и транспортировки грунта земснарядом сопровождается внутренними циклами механизмов папильонирования, подъема и опускания свай. Технологический режим прерывается, когда земснаряд, перемещаясь вдоль русла, выходит за допустимый для папильонирования уровень относительно точек якорных креплений троса *ЯК1* и *ЯК2*. Происходит операция смены точек крепления якорей, после чего технологический режим вновь продолжается.

В задачу автоматизации технологического комплекса земснаряда входит прежде всего обеспечение бесперебойной и строго согласованной работы его механизмов в соответствии с рассмотренными внутренними циклами технологического процесса. В схеме управления приводами отдельных механизмов предусматриваются защитные блокировки, исключающие неправильные включения, приводящие к нарушению технологического режима и аварийным ситуациям. Например, недопустима одновременная работа папильонажных лебедок в направлении выбора троса, что привело бы к недопустимому натяжению троса и к стопорению двигателей. Недопустим также одновременный подъем свай, препятствующих смещению земснаряда под действием течения и ветра относительно забоя, в котором выбирается грунт. Блокировки должны исключать неправильную последовательность включений приводов свай, папильонажных лебедок и т. п.

В технологическом цикле земснаряда есть операции, которые не удастся автоматизировать, и поэтому требующие участия в них обслуживающего персонала. К таким операциям относятся определение забоя, его направления и глубины, перестановка якорей. Кроме того, для земснаряда как плавучей передвижной установки предусматривается целый ряд других вспомогательных операций, требующих наличия команды. Присутствие персонала упрощает задачу автоматизации технологического процесса. Часть функций автоматического управления земснарядом возлагается на оператора-багермейстера.

Другой не менее важной задачей автоматизации данного технологического комплекса является автоматизация собственно электроприводов, обеспечивающая режим максимальной производительности снаряда. Так, электроприводы папильонажных лебедок желательно

выполнять регулируемыми с тем, чтобы в зависимости от твердости разрабатываемого грунта соответственно менялась скорость подачи рыхлителя. Желательно также иметь надежное ограничение натяжений тросов. Кроме того, с учетом эксплуатационных особенностей земснаряда электропривод должен обладать повышенной надежностью и быть простым в эксплуатации.

Указанным требованиям достаточно полно отвечает электропривод папилонажных лебедок, выполненный по системе источник тока – двигатель (ИТ – Д). Такая система привода (рис. 8-8) разработана на

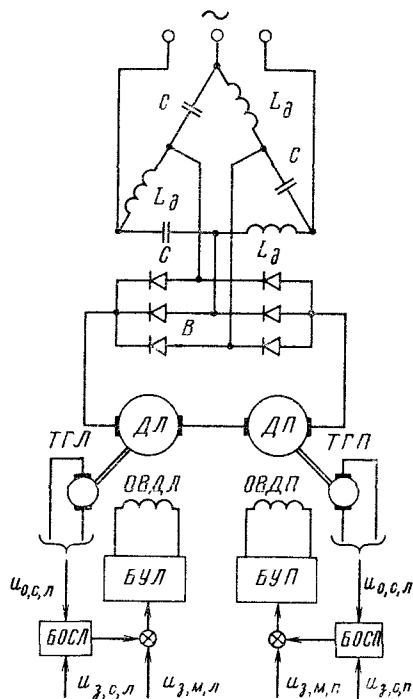


Рис. 8-8. Схема электропривода папилонажных лебедок.

кафедры автоматизированного электропривода в МЭИ и применена на отечественном земснаряде типа ЗГМ-350. В качестве источника тока ИТ используется трехфазный индуктивно-емкостный преобразователь, обеспечивающий практически неизменный уровень тока в якорной цепи в широком диапазоне изменения скорости двигателей. Двигатели правой ДП и левой ДЛ лебедок включены встречно-последовательно. При совместной работе лебедок, когда скорости двигателей одинаковые, их ЭДС взаимно компенсируются. Источник тока при этом ра-

ботает в режиме, близком к режиму короткого замыкания. Благодаря этому удается существенно снизить габариты и установленную мощность ИТ. При изменении тока возбуждения двигателя соответственно изменяется и его момент, оставаясь независимым от скорости. Таким образом, система ИТ — Д, как известно из теории электропривода, выполняет функцию регулятора момента. Это свойство электропривода используется здесь для надежного ограничения натяжений тросов лебедок.

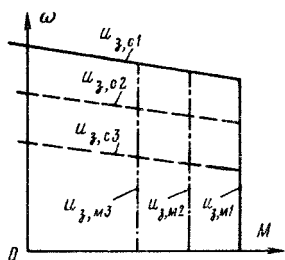


Рис. 8-9. Механические характеристики электропривода по системе ИТ — Д с заданиями по моменту и скорости.

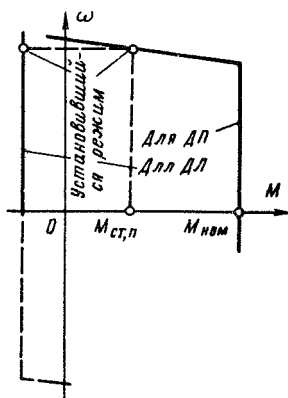


Рис. 8-10. Механические характеристики двигателей папильонажных лебедок при их совместной работе.

Обмотки возбуждения ДП и ДЛ питаются от индивидуальных блоков управления возбуждения БУП, БУЛ. На каждый блок управления подаются два задания: по моменту (натяжению троса) $u_{з,м,п}$, $u_{з,м,л}$ и по скорости $u_{з,с,п}$, $u_{з,с,л}$. Сигналы обратной связи по скорости $u_{о,с,п}$, $u_{о,с,л}$ снимаемые с тахогенераторов ТП, ТЛ, действуют через блоки отсечки БОСП, БОСЛ. В результате до определенной скорости (отсечки) момент двигателя остается постоянным и определяется значением $u_{з,м}$. При скорости выше отсечки вступает в действие обратная связь и момент двигателя уменьшается до момента сопротивления.

На рис. 8-9 показаны механические характеристики электропривода, собранного по схеме рис. 8-8. При совместной работе лебедок двигатели ДП и ДЛ получают разные задания по моменту (рис. 8-10). Двигатель, работающий в режиме торможения, развивает меньший момент (ДЛ на рис. 8-10).

Зная тип разрабатываемого грунта, багермейстер может выбрать соответствующую установку скорости папильонирования. Однако грунты имеют неоднородности, которые могут приводить к перегрузкам двигателя рыхлителя. Поэтому оператор должен непрерывно следить за процессом папильонирования и вмешиваться при необходимости

сти в режим управления скоростью лебедок. При таком управлении по разомкнутому принципу производительность установки зависит от опытности багермейстера.

Более совершенной будет работа земснаряда, если взаимно автоматизировать приводы папильонажных лебедок и рыхлителя, введя, например, дополнительно обратную связь по нагрузке двигателя рыхлителя в систему электропривода лебедок. Следует отметить, что электропривод, выполненный по схеме рис. 8-8, при использовании в качестве БУП и БУЛ магнитных усилителей оказывается весьма простым по устройству и надежным в эксплуатации. В данном приводе используются двигатели типа ПБСТ-62 мощностью по 7,2 кВт со встроенным тахогенератором. Установленная мощность источника тока составляет 20 кВт, КПД — 0,9—0,95, коэффициент мощности — 1.

Простота и надежное ограничение момента позволяют использовать систему ИТ — Д и для привода механизма подъема и опускания сваи. Следует отметить, что для прочного углубления сваи в грунт оказывается недостаточным собственного веса сваи и требуется дополнительное усилие, развиваемое двигателем. При этом привод работает при опускании сваи на упор. Для ограничения нагрузок и обеспечения надежного углубления сваи желательно, чтобы электропривод развивал постоянный максимально допустимый и не зависящий от скорости момент. С такой задачей успешно справляется система ИТ — Д. Для остальных механизмов: рыхлителя, подъемной лебедки рыхлителя, землесоса — не требуется регулирования скорости, поэтому в качестве их электроприводов применяются асинхронные двигатели.

ПРИЛОЖЕНИЕ

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТИПОВЫХ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Таблица П-1

Коэффициент полезного действия пары зубчатых колес на подшипниках качения

Вид передачи	Закрытые передачи с жидкой смазкой	Открытые передачи с консистентной смазкой
Цилиндрическая	0,97—0,99	0,95—0,97
Коническая	0,96—0,98	0,94—0,95

Таблица П-2

Средние значения КПД червячных редукторов с учетом потерь на трение в опорах

Число вятков (заходность червяка)	η
1	0,7—0,75
2	0,75—0,82
3—4	0,82—0,92

Таблица П-3

Средние значения КПД блоков полиспастов*

Вид подшипников блоков полиспаста	$\eta_{бл}$
Качения	0,98
Скольжения	0,95

* $\eta_{пл} = \eta_{бл} i_{пл} - 1$, где $i_{пл}$ — кратность полиспаста; $\eta_{бл}$ — КПД блоков.

Таблица П-4

Коэффициент трения μ для подшипников ходовых колес механизмов передвижения

Вид подшипника	μ
Скольжения:	
открытого типа	0,1
букса с жидкой смазкой	0,08
Качения:	
шариковые и роликовые	0,015
конические	0,02

Таблица П-5

Коэффициент трения качения f ходовых колес механизмов передвижения, 10^{-3} м

Диаметр ходового колеса, м	Ходовые колеса			
	стальные		чугунные	
	Тип рельса			
	плоский	с выпуклой головкой	плоский	с выпуклой головкой
0,2—0,3	0,3	0,4	0,4	0,5
0,4—0,5	0,5	0,6	0,6	0,7
0,6—0,7	0,6	0,8	0,8	0,9
0,8—1,0	0,7	1—1,2	0,8	1,2—1,4

Таблица П-6

Экспериментальные значения коэффициента k_p трении реборд ходовых колес механизмов передвижения о рельсы

Вид механизма передвижения	Тип привода	Ходовые колеса		
		с цилиндрическим ободом		с коническим ободом
		Подшипники опор ходовых колес		
		скольжения	качения	
Крановая тележка	Общий (центральный) привод ходовых колес	1,2—1,3	2—2,3	1,2—1,3
		1,3—1,5	2,3—2,5	1,2—1,3
Крановый мост	Индивидуальный привод ходовых колес	—	1,5—2	—

Таблица П-7

Значения результирующего коэффициента сопротивления движению C_p для конвейеров с подвижными опорами на подшипниках качения

Тип конвейера	$C_p, 10^{-2}$
Канатная дорога	0,6—0,7
Ленточные и цепные конвейеры	2,0—2,5

Таблица П-8

Значения результирующего коэффициента сопротивления движению C_{Σ} на участках изгиба трассы конвейера

Вид участка изгиба трассы	№ рис.	Угол обхвата α	$C_{\Sigma} \cdot 10^{-2}$
Звездочка с цепью и шкиф с канатом	6-2,а	$90-180^{\circ}$	2-3
Барабан с лентой	6-2,а	$90-180^{\circ}$	4-6
Цепь с катками по шине	6-2,б	$20-45^{\circ}$	1,2-3
Лента на роликовой батарее	6-2,б	$20-45^{\circ}$	1,2-3
Цепь на роликовой батарее	6-2,в	$30-60^{\circ}$	2,5-3,7

Таблица П-9

Коэффициент трения μ между тяговым и приводным элементами

Тип конвейера	μ
Ленточный	0,1-0,3
Канатная дорога	0,12-0,25

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В. П., Сабинин Ю. А. Основы электропривода. — Л. — М.: Госэнергоиздат, 1963. — 722 с.
2. Основы автоматизированного электропривода/Чиликин М. Г., Соколов М. М., Терехов В. М., Шинянский А. В. — М.: Энергия, 1974. — 568 с.
3. Сиротин А. А. Автоматическое управление электроприводами. — М.: Энергия, 1969. — 560 с.
4. Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода. — М.: Энергия, 1979. — 616 с.
5. Соколов М. М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. — М.: Энергия, 1976. — 540 с.
6. Ключев В. И., Терехов В. М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. — М.: МЭИ, 1971. — 224 с.
7. Крановое электрооборудование: Справочник/ Под ред. А. А. Рабиновича. — М.: Энергия, 1979. — 240 с.
8. Меклер А. Г. Электрооборудование подъемно-транспортных машин. — М.: Машиностроение, 1965. — 535 с.
9. Яуре А. Г., Богословский А. П., Певзнер Е. М. Электроприводы судовых грузоподъемных механизмов. — Л.: Судостроение, 1971. — 184 с.
10. Дранников В. Г., Звягин И. Е. Автоматизированный электропривод подъемно-транспортных машин. — М.: Высшая школа, 1973. — 278 с.
11. Волков Д. П. Динамика и прочность одноковшовых экскаваторов. — М.: Машиностроение, 1965. — 463 с.
12. Егоров К. А. Системы управления пассажирскими лифтами. — М.: Стройиздат, 1977. — 240 с.
13. Дьячков В. К. Машины непрерывного транспорта. — М.: Машиностроение, 1971. — 362 с.
14. Дукельский А. И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны. — М.: Машиностроение, 1966. — 481 с.
15. Островский А. С. Электроприводы поточно-транспортных систем. — М.: Энергия, 1967. — 184 с.

16. Семидуберский М. С. Насосы, компрессоры, вентиляторы. — М.: Промстройиздат, 1957. — 223 с.
17. Зимин Е. Н., Чувазов И. И. Электрооборудование промышленных предприятий. — М.: Стройиздат, 1977. — 431 с.
18. Правицкий Н. К. Рудничные подъемные установки. — М.: Госгортехиздат, 1963. — 416 с.
19. Крайцберг М. И. Электроприводы строительных машин и механизмов. — М.: Госэнергоиздат, 1958. — 326 с.
20. Мартынов М. В., Переслегин Н. Г. Автоматизированный электропривод в горной промышленности. — М.: Недра, 1977. — 374 с.
21. Белянин П. Н. Промышленные работы. — М.: Машиностроение, 1975. — 398 с.
22. Кулешов В. С., Лакога Н. А. Динамика систем управления манипуляторами. — М.: Энергия, 1971. — 304 с.
23. Андрущенко С. Н., Ворошилов М. С., Петров Б. А. Проектирование приводов манипуляторов. — Л.: Машиностроение, 1975. — 310 с.
24. Ключев В. И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. — М.: Энергия, 1971. — 320 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

- Автоматизация процесса точной остановки 183
- рабочего цикла позиционная 183
- — — цикловая 182, 193, 196

Б

- Блокировка дуговая 146
- контакторов механическая 128
- — электрическая 127
- нулевого положения командо-контроллера 131; 134, 140
- Быстродействие оператора 89
- электропривода 90

В

- Вентилятор 10, 28
- Время паузы 47
- работы 47
- цикла 47, 197

Г

- Генератор с самовозбуждением 160
- — — критическим 165
- Груз балластный 38

Д

- Датчик индуктивный 194, 230
- отклонения от уровня точной остановки 194, 210
- Двигатель крановый 47
- — многоскоростной 48

- открывания днища ковша 162
- Декремент логарифмический 62
- Демпфирование колебаний 63
- Диаграмма замыкания контактов несимметричная 134
- — — симметричная 131
- индикаторная
- нагрузочная 50
- Диапазон регулирования подачи
- — скорости 150
- — — по условию точной остановки 204
- Дорога канатная 260

Ж

- Жесткость механической связи 61
- — характеристики динамическая 101
- — — статическая 105

З

- Задатчик интенсивности 209, 253
- Зазор кинематический 66
- Законы пропорциональности 301
- Защита конечная 131, 141
- максимальная 131
- от затянувшегося пуска 293
- от обрыва цепи возбуждения 248
- Звено ограничения 152
- Земснаряд 341

И

- Инерционность некомпенсируемая 97

К

- Колебания упругие механические 56
- Колебательность электромеханической системы 62
- Компенсация температурных изменений тока 163, 176
- Комплекс технологический 336
- Компрессор 28
- Конвейер ленточный 24, 268, 272, 283
 - цепной 24, 268, 274
- Контроллер магнитный крановый 129
 - силовой 126
- Контур регулирования напряжения 157
 - — скорости 98
 - — тока 97
- Коррекция параллельная 94
 - последовательная 95
 - последовательно-параллельная 154
- Коэффициент динамичности 65, 68, 77
 - отсечки 74
 - полезного действия гидравлический 301
 - — — объемный 301
 - сопротивления движению 264
 - трения 264
 - увеличения натяжения 267
 - уравнивания 38
 - форсировки 79
- Кран башенный 12, 14
 - кабельный 12
 - мостовой 12

Л

- Лебедка двухконцевая 32, 37
 - — уравнивающая 21, 40
 - одноконцевая 36
 - подъемная 11, 32
 - тяговая 17, 32
- Лифт грузовой 21, 221
 - пассажирский 21, 221

354

М

- Манипулятор промышленный командный 18
 - — копирующий 18, 21
- Метод предварительного выбора двигателя 50
- Механизм непрерывного режима работы 22
 - общепромышленный типовой 30
 - передвижения 11
 - поворота 13
 - подъема 16
 - поршневого типа 29
 - центробежного типа 29, 300
 - циклического режима работы 181
- Модель динамическая конвейера 275
- Модуль жесткости механической характеристики 105
- Момент активный 32
 - ветровой нагрузки 45
 - динамический электропривода конвейера 276
 - — — механизмов передвижения и поворота 45
 - — — — подъема 37, 41
 - механических потерь 34
 - реактивный 32
 - среднеквадратичный 52
 - стопорный 73

Н

- Нагрузка крана ветровая 45
 - электропривода вентиляторная 303
 - — динамическая 37, 41, 45, 276
 - — несимметричная 35
 - — симметричная 41
 - — статическая 36
- Напор 300
- Насос центробежный 28, 302
- Натяжение тягового элемента максимальное 271, 274
 - — — набегания 265

- — сбегаания 268
- Неточность остановки допустимая 189
- — максимальная 185

О

- Объект регулирования 97
- Оптимум симметричный 207
 - технический 97, 206
- Остановка точная электропривода 183
- Ошибка регулирования динамическая 208
 - — статическая 206

П

- Панель защитная крановая 123
- Парусность сооружения 44
- Переключатель этажный 227
- Погрешность кинематическая 70
- Подача 300
- Подъемник действия непрерывного 26
 - — циклического 21
 - скиповой 222
- Пределы изменения нагрузки электропривода 200
- Продолжительность включения 47
- Процесс выбора зазоров 67
 - стопорения 76
 - точной остановки 184
- Пуск конвейерных линий поочередный 295

Р

- Радиус приведения 305
- Раскачивание грузов 279
- Распределение нагрузок в многодвигательном приводе конвейера 282
- Регулятор напряжения 153, 157
 - положения 211
 - скорости 99
 - тока 97
- Режим однофазного включения 137

- работы крана 53
- Реле давления
 - заливки
 - поплавковое
- Робот 19
- Рывок 203

С

- Связь механическая жесткая 56
 - — упругая 56, 65
 - обратная единичная 211
 - — с отсечкой 94, 159
- Селектор 227, 229, 231
- Система регуляторов блочная унифицированная 96
 - упругая двухмассовая 57, 65
- Спуск силовой 35, 137
 - тормозной 35, 137
- Структура подчиненного регулирования координат электропривода 95
 - с суммирующим усилителем 93
 - унифицированная экскаваторного электропривода 152
- Схема безопасного спуска 119
 - кинематическая 31, 33, 38
 - плавного выбора зазоров в передачах 69
 - шунтирования якоря 118

Т

- Торможение асинхронного двигателя динамическое с самовозбуждением 111
- Тормозной генератор 109
- Точность регулирования 206, 208

У

- Узел выбора направления движения 228, 231
 - замедления 234
 - контроля положения кабины 227
- Уравнения движения электропривода 84
 - Лагранжа 83

Уравновешивание подъемных лебедок 38
Ускорение допустимое 197
Устройство натяжное 24

Ф

Формирование переходных процессов 203
Формула Эйлера 268, 301
Форсирование процесса возбуждения 79

Х

Характеристика магистрали 302
— нагрузки вентиляторная 304
— $Q - H$ 302
— электропривода реостатная 131
— — экскаваторная 74

Ц

Цикл работы 197

Ч

Частота включений кранового электропривода 53

— колебаний свободных 57, 227
Число степеней свободы манипулятора 85

Ш

Шунтирование якоря 118

Э

Экскаватор одноковшовый драглайн 15
— — лопата 15
— роторный
Электромагнит крановый подъемный 146
— механического тормоза 131, 145
Электропривод безредукторный 246
— крановый с вихревым генератором 109
— многодвигательный 71, 282
— открывания днища ковша 16
Элемент тяговый 266
Эскалатор 22, 297

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава первая. Типовые общепромышленные механизмы . . .	8
1-1. Классификация общепромышленных установок . . .	8
1-2. Обзор общепромышленных механизмов циклического действия	11
1-3. Обзор общепромышленных механизмов непрерывного действия	22
1-4. Типовые общепромышленные механизмы	29
Глава вторая. Электропривод типовых общепромышленных механизмов циклического действия	31
2-1. Статические и динамические нагрузки электроприводов подъемных и тяговых лебедок . 15, 26 . . .	31
2-2. Статические и динамические нагрузки электроприводов механизмов передвижения и поворота . 27 . . .	42
2-3. Выбор двигателей для механизмов циклического действия	46
2-4. Влияние упругих механических связей на динамику механизмов циклического действия . 48	56
2-5. Особенности динамики редукторных электроприводов инерционных механизмов	65
2-6. Ограничение механических перегрузок электроприводов типовых общепромышленных механизмов циклического действия	72
2-7. Особенности статики и динамики взаимодействующих электроприводов промышленных манипуляторов . . .	80
2-8. Типовые структуры электроприводов механизмов командных манипуляторов	89
	357

Глава третья. Примеры схем электропривода машин, управляемых оператором	106
3-1. Электропривод подъемных кранов	106
3-2. Контроллерное управление крановыми электроприводами	122
3-3. Крановые магнитные контроллеры	128
3-4. Управление подъемными электромагнитами	145
3-5. Электропривод основных механизмов одноковшовых экскаваторов	148
3-6. Схемы экскаваторного электропривода с суммирующим усилителем	157
3-7. Примеры схем экскаваторных электроприводов со структурой подчиненного регулирования	164

Глава четвертая. Автоматизация типовых общепромышленных механизмов циклического действия	181
4-1. Общие сведения	181
4-2. Автоматическая точная остановка подъемно-транспортных механизмов	183
4-3. Автоматическое регулирование положения при цикловой автоматизации	193
4-4. Влияние динамических свойств электропривода на производительность механизмов при цикловой автоматизации	196
4-5. Типовые структуры электропривода общепромышленных механизмов с автоматизированным рабочим циклом	204
4-6. Особенности следящих электроприводов копирующих манипуляторов	215

Глава пятая. Примеры схем электропривода установок с автоматической обработкой цикла	220
5-1. Системы электропривода подъемных установок	220
5-2. Основные узлы схем управления многопозиционными подъемниками	226
5-3. Электропривод лифта с двухскоростным асинхронным двигателем	237
5-4. Электропривод скоростного лифта	246
5-5. Электропривод шахтного скипового подъемника	255
5-6. Электропривод канатной дороги маятникового типа	260

Глава шестая. Электропривод и автоматизация механизмов непрерывного транспорта	263
6-1. Статические и динамические нагрузки приводов механизмов непрерывного транспорта	263
6-2. Определение мощности и месторасположения приводных станций конвейеров	270
6-3. Особенности статики и динамики электропривода конвейеров	275
6-4. Электропривод механизмов непрерывного транспорта	285
6-5. Автоматизация механизмов непрерывного транспорта	292
6-6. Примеры схем электропривода механизмов непрерывного транспорта	297
Глава седьмая. Электропривод и автоматизация механизмов центробежного и поршневого типов	300
7-1. Определение момента сопротивления и мощности на валу механизмов	300
7-2. Регулирование подачи механизмов центробежного типа	308
7-3. Электропривод механизмов центробежного и поршневого типов	310
7-4. Автоматизация механизмов центробежного и поршневого типов	323
7-5. Примеры схем электропривода механизмов центробежного и поршневого типов	330
Глава восьмая. Примеры электропривода и автоматизации технологических комплексов	336
8-1. Роторный экскаватор	336
8-2. Землесосный снаряд	341
Приложение	347
Список литературы	351
Предметный указатель	353

ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ КЛЮЧЕВ
ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ ТЕРЕХОВ

Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов

Редактор А. М. Усманов
Редактор издательства Л. А. Решмина
Переплет художника Е. Н. Волкова
Технический редактор Н. Н. Хотулева
Корректор Г. А. Полонская
ИБ № 2149

Сдано в набор 08.10.79. Подписано в печать 19.06.80. Т-12442. Формат 84 × 108¹/₃₂. Бумага типографская № 1. Гарн. шрифта Таймс. Печать высокая. Усл. печ. л. 18,9. Уч.-изд. л. 21,48. Тираж 40000 экз. Заказ 933. Цена 90 к.

Издательство «Энергия». 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136, Ленинград, П-136, Чкаловский пр., 15.